

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari en Enginyeria Industrial

Disseny de motor i transmissió per la conversió d'una motocicleta de combustió en elèctrica

MEMÒRIA

Autor: Andreu Guasch Casadevall
Director: Miquel Sararols Figueras
Convocatòria: Juny 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest estudi, titulat "Disseny de motor i transmissió per la conversió d'una motocicleta de combustió en elèctrica" pretén ser una primera aproximació metodològica al procés de disseny d'un motor elèctric i una transmissió directa per corretja.

Partint de la motocicleta de combustió original i, després d'una etapa d'estudi de mercat, es defineixen tot un seguit d'especificacions que s'hauran de complir en la motocicleta elèctrica i, a partir d'aquestes, es fan els càlculs i el disseny pertinents per arribar finalment a la integració del conjunt, incloent alguns dels altres components principals com són el paquet de bateries. En l'estudi s'utilitzen eines avançades de disseny dels elements mecànics i un programa de simulació amb elements finits per avaluar i validar el disseny del sistema elèctric.

Aquest estudi s'ha plantejat amb un objectiu integrador dels coneixements adquirits en el grau d'Enginyeria Industrial, on les assignatures optatives que vaig cursar tenien com objectiu potenciar els meus coneixements d'electrònica, i amb els coneixements adquirits al màster, on he cursat la especialització en mecànica. Addicionalment, aquest projecte ha estat la continuació natural de la meua activitat com a participant en els projectes Smart Moto Challenge i Formula Student.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	2
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	7
2.1. Origen del projecte.....	7
2.2. Motivació	7
3. INTRODUCCIÓ	9
3.1. Objectius del projecte	9
3.2. Abast del projecte	9
4. PLANIFICACIÓ	11
5. ESPECIFICACIONS	12
5.1. Model de referència	12
5.2. Estudi de mercat	14
5.2.1. Bateria	14
5.2.2. Transmissió	15
5.2.3. Motor.....	15
5.3. Especificacions finals.....	16
5.3.1. Bateria	16
5.3.2. Transmissió	19
5.3.3. Motor.....	22
5.3.4. Resum d'especificacions del motor i transmissió	23
6. DISSENY DEL MOTOR	24
6.1. Paràmetres elèctrics	24
6.1.1. Esquema de connexió	24
6.1.2. Intensitat nominal del motor.....	24
6.1.3. Número de pols i dents	25
6.1.4. Velocitat de rotació del camp magnètic.....	26
6.1.5. Àrea de debanat.....	26
6.1.6. Encoder	27
6.2. Paràmetres mecànics	27
6.2.1. Càlcul diàmetre de l'eix.....	28
6.2.2. Càlcul dels rodaments	29
6.3. Refrigeració.....	30

6.4. Selecció de materials	30
6.4.1. Imants	30
6.4.2. Estator	30
6.4.3. Rotor	30
6.4.4. Eix motor	30
6.4.5. Carcassa	31
6.5. Simulació	31
6.5.1. Geometria	32
6.5.2. Materials	32
6.5.3. Resultats	33
6.5.3.1. Angle òptim respecte CM i rotor.	33
6.5.3.2. Optimització de les dimensions	34
6.5.3.3. Corbes motor final	35
6.6. CAD	37
6.6.1. Procés de muntatge	38
7. DISSENY DE LA TRANSMISSIÓ	46
7.1. Politges	46
7.2. Corretja	47
8. ACOBLAMENT	49
8.1. Bateria	50
8.2. Motor	51
8.3. Transmissió	51
9. PRESSUPOST	52
9.1. Pressupost projecte	52
9.2. Pressupost conversió	53
CONCLUSIONS	55
AGRAÏMENTS	57
BIBLIOGRAFIA	58

1. Glossari

PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Motor*

PMAC – *Permanent Magnet AC*

DC – *Direct Current*

AC – *Alternating Current*

CM – *Camp Magnètic*

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

L'ús extensiu de combustibles fòssils en l'últim segle ha generat molts problemes mediambientals. En l'àmbit de la mobilitat, els motors de combustió interna generen, a més de CO₂, un seguit de gasos nocius tant per la salut humana com per a la resta d'éssers vius del planeta. A això, se li suma la dependència que genera del petroli i derivats, provocant una variabilitat en els preus que depèn de grans lobbys internacionals i que tenen preus cada dia més elevats.

Tradicionalment el vehicle de dues rodes ha anat de la mà amb la millora de la tecnologia. Des de la invenció de la roda, els carros i les bicicletes fins a arribar a l'actualitat on la indústria de l'automoció, tant d'una com de dues rodes és un dels principals mercats d'innovació.

Actualment però, el rendiment dels motors de combustió no ha augmentat com s'esperava; un altre factor a considerar és que són màquines molt complexes i amb moltes peces que requereixen molt de manteniment.

Històricament, tot i ser molt més eficients que els vehicles de combustió, els vehicles elèctrics han tingut un handicap molt gran, que és l'autonomia. A diferència dels de combustió, un vehicle elèctric no podia fer més d'uns 100 km abans d'esgotar les bateries. Actualment, amb la millora de la tecnologia en emmagatzematge d'energia elèctrica, hi ha automòbils capaços de fer 500 km sense recarregar i motocicletes capaces de recórrer 200km i la previsió és que aquests rangs vagin augmentant amb el temps.

Aquesta nova línia d'investigació, va lligada amb el canvi necessari en el model energètic que ja s'està aplicant en molts països. L'aposta per les energies renovables ja està donant fruits en molts països beneficiant l'economia i la salut dels seus ciutadans.

2.2. Motivació

La elecció d'aquest treball respon a dos motius principals: el primer és la passió per les dues rodes i per les noves tecnologies, i el segon la consciència global.

L'autor i propietari de la motocicleta en qüestió, és apassionat pels vehicles de dues rodes tant amb motor com sense motor. A meitats de la seva etapa universitària entra a formar part en equips de la universitat que desenvolupen prototips de motocicletes i monoplaces 100% elèctrics i "a posteriori" ha treballat en temes de gestió d'energia elèctrica i desenvolupant

vehicles elèctrics.

Actualment el món està en procés de transició energètica per arribar a una societat més eficient i conscienciada amb el medi ambient. Projectes vinculats a una millora en aquest àmbit són una oportunitat per demostrar l'aposta ferma que es fa des d'alguns dels sectors de l'enginyeria per tal de contribuir en aquesta transició.

3. Introducció

Aquest treball pretén ser un projecte de disseny de producte que compregui més d'una disciplina de l'enginyeria. Per una banda, hi ha una part de disseny a nivell elèctric i per altra una part de disseny mecànic. Els aspectes elèctrics i els mecànics no es poden tractar de forma aïllada donat que les decisions que es prenguin en cadascuna de les parts té impacte en les altres.

Tot i que el treball segueix sempre el mateix ordre en els apartats d'anàlisi de mercat, especificacions, etc; el desenvolupament de tots els components descrits s'ha fet de forma paral·lela i per tant en alguns dels apartats es farà menció a decisions preses en apartats posteriors. Tot i que no forma part dels objectius del treball, per tal de dimensionar correctament el motor per un cas real s'han pres bastantes decisions a nivell bateries per tal de que en una situació real es pugui dur a terme el projecte tenint en compte tots els factors com, per exemple, l'espai disponible.

En l'estudi s'han utilitzat eines avançades de disseny mecànic com són CATIA V5 i Solidworks i eines per al càlcul d'elements finits electromagnètics com el software FEMM

3.1. Objectius del projecte

Els objectius principals del projecte han estat

- Especificació dels requisits de disseny.
- Disseny d'un motor elèctric per una motocicleta Honda CB600F7 en base a les especificacions definides.
- Disseny de la línia de transmissió per una motocicleta Honda CB600F7 en base a les especificacions definides.
- Acoblament del conjunt dins de la motocicleta

3.2. Abast del projecte

Degut a la complexitat del projecte i al temps disponible, aquest treball serà un estudi o fase de pre-projecte que inclourà l'estudi de mercat, definició d'especificacions, dimensionament bàsic i disseny en 3D. Finalment es pretén proposar una solució per l'acoblament dels components dins de la motocicleta i fer els plànols del motor i la transmissió.

Dins del dimensionament s'inclouran els paràmetres elèctrics bàsics per al funcionament del

motor i càlculs tant a nivell teòric com simulat d'alguns dels esforços als que estarà sotmès el motor.

4. Planificació

El marc temporal en el que es desenvolupa aquest projecte és un quadrimestre escolar, més concretament, de Febrer a Juny de l'any 2018. Les diferents tasques del projecte s'han repartit equitativament dins d'aquest temps per tal de poder complir amb els objectius amb el temps del que es disposa.

Durant els dos primers mesos, es preveu fer una primera etapa de contextualització juntament amb un estudi de mercat i la definició de les especificacions per la motocicleta final. La resta del temps, anirà destinat al disseny del motor i transmissió i a la integració d'aquests a la motocicleta.

A continuació es detalla el diagrama de Gantt amb totes les tasques a fer.

ACTIVITAT	INICI	FINAL																				
Inici del projecte	4/2/2018																					
Planificació	5/2/2018	9/2/2018																				
CAD Honda CB600F7	9/2/2018	11/3/2018																				
Benchmarking	11/2/2018	13/3/2018																				
Especificacions	14/3/2018	3/4/2018																				
Disseny motor	4/4/2018	4/5/2018																				
Disseny transmissió	14/4/2018	14/5/2018																				
Integració	16/4/2018	16/5/2018																				
Plànols	24/4/2018	9/5/2018																				
Estudi de cost	9/5/2018	30/5/2018																				
Redacció projecte	14/5/2018	13/6/2018																				
Final del projecte		30/6/2018																				
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
			Febrer				Març				Abril				Maig				Juny			

Taula 1. Planificació

5. Especificacions

5.1. Model de referència

Aquest projecte, com s'ha dit anteriorment parteix de les especificacions de la motocicleta de la marca Honda i model CB600f de l'any 2007. Per fer el dimensionament del sistema de tracció elèctrica s'han utilitzat tant dades obtingudes per experiència pròpia de l'autor com de bibliografia disponible.



Figura 1. Honda CB600F7

Aquesta, és un model semi esportiu amb un motor de combustió de 4 cilindres en línia. Desenvolupa una potència màxima teòrica al motor de 75,4 kW a 12000 min⁻¹. A continuació es detallen les especificacions del fabricant que són d'interès per a aquest projecte.

MOTOR

Tipus	4 tiempos, 4 en línea, 16 válvulas, DOHC y refrigeración líquida
Cilindrada	599 cm ³
Potència Màxima	75 kW / 12.000 min ⁻¹
Parell Màxim	63,5 Nm / 10.500 min ⁻¹
Capacidad de aceite	3,5 litres

DIPÒSIT COMBUSTIBLE

Capacitat	19 litres
Consum mitjà	6 litres/100km

TREN DE TRANSMISSIÓ

Tipus de transmissió	6 velocitats
Reducció primària	2,111 (76/36)
Relacions del canvi	2,750 (33/12)
	1,938 (31/16)
	1,556 (28/18)
	1,348 (31/23)
	1,208 (29/24)
	1,095 (23/21)
Reducció final	2,688 (43/16)
Transmissió final	Cadena #525

BASTIDOR

Tipus	Mono-Columna; de fundició d'alumini per gravetat y amb secció rectangular
Distancia lliure al terra	135 mm
Pes en ordre de marxa	198 kg (F: 98,2 kg; R: 99,8 kg)

Taula 2. Especificacions Honda CB600F7

Per poder fer el dimensionament de les bateries s'ha calculat la distància màxima que pot recorre la motocicleta amb un sol dipòsit.

$$(1) \quad \frac{\text{Volum dipòsit}}{\text{Consum/km}} = \frac{19 * 100}{6} = 317 \text{ km}$$

Tenint en compte que el motor arriba a les 13000 min⁻¹ i la relació de transmissió de la motocicleta s'ha calculat la velocitat màxima.

$$(2) \quad \frac{\text{min}^{-1} * 60 \text{ min} * 2 * \pi \text{ rad} * r \text{ roda} * 1 \text{ km}}{1 \text{ h} * 1 \text{ min}^{-1} * \text{relació transmissió} * 1000 \text{ m}} = \frac{13000 * 60 * 2 * \pi * 0.3149}{6.21 * 1000} = 248.36 \text{ km/h}$$

Aquesta velocitat màxima és merament teòrica ja que la velocitat màxima real vindrà donada per l'equilibri de forces de fricció amb la força del terra que es presentarà més endavant.

L'acceleració de la motocicleta vindrà donada per la força que fa la roda sobre el terra. Per això s'ha calculat la força que fa sobre el terra per cadascuna de les marxes.

$$(3) \text{ Força sobre el terra} = \frac{\text{Parell} * \text{Relació transmissió}}{\text{Radi roda}}$$

MARXA	FORÇA SOBRE EL TERRA (N)
1	3146
2	2216
3	1779
4	1542
5	1382
6	1253

Taula 3. Força sobre el terra

5.2. Estudi de mercat

Abans de començar la fase purament de disseny, en tot procés d'enginyeria hi ha una etapa d'estudi de mercat que ens permetrà orientar les primeres decisions, conèixer les possibles opcions i els camins a seguir.

En aquest cas s'ha fet un estudi de mercat analitzant 15 motocicletes elèctriques del mateix segment de mercat en el que es situa la Honda CB600F. A l'Annex 1 es pot trobar una taula comparativa amb tots els models i les seves especificacions obtingudes de les seves respectives pàgines web.

A partir d'aquesta comparació es fa evident que hi ha un clar camí a seguir en quant al disseny i també queda patent la problemàtica més gran que hi ha actualment a la hora de desenvolupar un vehicle d'aquestes característiques.

5.2.1. Bateria

En l'actualitat, les tecnologies basades en el liti són les més usades a nivell de mobilitat ja que

són les que tenen major densitat d'energia. Dintre aquest grup destaquen les bateries de Liti-lo i les bateries de Liti-Polimer. El voltatge de les bateries en tots els casos es superior al 100V i tenen capacitats per sobre els 10kWh.

En l'apartat de les bateries és on es veu la problemàtica més gran en el món de la mobilitat elèctrica. La densitat d'energia de les bateries encara és molt inferior a la dels combustibles fòssils que es fan servir actualment i, tot i que els rendiments són molt més elevat en el cas elèctric, no n'hi ha suficient per compensar aquesta falta d'energia.

Es pot observar a la taula comparativa que teòricament els quilometres que pot fer una motocicleta per kWh en cas de circular per autopista a 90km/h aproximadament és d'aproximadament 10-12km/kWh. El total de km que es poden fer en el millor dels casos en les condicions anteriorment mencionades és de 200km, cosa que és molt inferior a l'autonomia d'una motocicleta de prestacions equivalent en combustió.

5.2.2. Transmissió

En aquest àmbit no hi ha una aposta clara del sector, tot i que si dos variants molt clares.

Per una banda tenim els models que, amb la mateixa filosofia que en les motocicletes de combustió, tenen una caixa de canvis amb entre 5 i 6 marxes. Això permet tenir una força sobre el terra variable en funció de la marxa, el que permet per una banda tenir velocitats punta més altes sense comprometre l'acceleració a baixa velocitat i per altra banda mantenir el consum i la eficiència.

El segon cas són les motocicletes que tenen una transmissió directa "Direct Drive". Aquestes disposen només d'una relació de transmissió fixa amb la que es va des de parat fins a la velocitat màxima. Aquest sistema té diversos avantatges com són la simplicitat i l'estalvi de pes en relació al cas de caixa de canvis. Per contra, s'ha de tenir molt més clar l'ús al que va destinat el vehicle i quines prestacions ha de tenir.

5.2.3. Motor

En la majoria de les motocicletes elèctriques d'altres prestacions que hi ha actualment al mercat o en fase de prototipatge s'ha utilitzat un motor trifàsic d'imants permanents. Aquesta decisió és deguda a que aquests motors, també anomenats PMAC (*Permanent Magnet AC Motor*) o PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*), són els que tenen una eficiència més elevada així com una densitat d'energia més gran. El parell motor en aquest tipus de motors es manté constant al llarg de tot el rang de revolucions fins que queda limitat exclusivament per la potència màxima.

Tots aquest motors van refrigerats per aigua o oli, d'aquesta manera poden arribar a unes

prestacions per sobre de les que tindrien només amb refrigeració per aire.

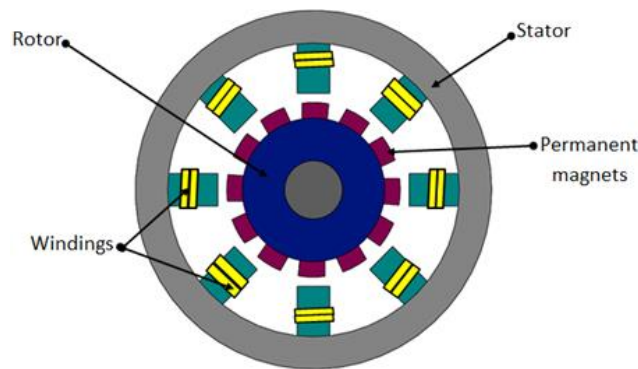


Figura 2. PMSM

5.3. Especificacions finals

Dins dels objectius d'aquest projecte s'inclou el disseny de la part elèctrica de la motocicleta mantenint les prestacions de la motocicleta de combustió original. En els següents apartats es justifiquen les decisions preses en pro d'aquest objectiu.

5.3.1. Bateria

Per dimensionar la bateria s'han de tenir en compte 5 paràmetres:

- Capacitat d'energia (kWh)
- Potència nominal (kW)
- Potència màxima (kW)
- Pes (kg)
- Volum (m^3)

Tal i com hem vist anteriorment, amb la tecnologia actual no es pot igualar el rang d'una motocicleta de combustió. És per això que l'objectiu és tenir un rang moderat d'entre 100 i 200 km.

En base al consum, l'energia específica del combustible i els rendiments del motor de combustió, s'ha trobat l'energia útil per km de la motocicleta de partida que és aproximadament de 0,109 kWh/km i s'ha estimat el pes del conjunt de combustió. Tota aquesta informació es troba resumida en la taula següent.

Dades combustible

Densitat	680	kg/m ³
Energia específica	9605,6	kWh/m ³

Dades Honda

Volum dipòsit	19	litres
Consum	6	litres/100km
Distància màxima	317	km

Rendiments

Motor	0,22
Reducció primària	0,95
Caixa canvis	0,95
Cadena	0,95

Energies

Energia total dipòsit	182,5	kWh
Energia útil dipòsit	34,4	kWh
Energia total per km	0,58	kWh/km
Energia útil per km	0,109	kWh/km

Pesos

Pes motor + Caixa de canvis	62	kg
Pes oli motor	3,664	kg
Pes gasolina	12,9	kg
Total	78,6	kg

Taula 4. Càlculs Honda CB600F7

A partir d'aquestes dades i fent enginyeria inversa, és a dir partint de l'energia útil per quilòmetre, s'ha calculat els quilometres que es podran fer depenent de la quantitat d'energia de la bateria.

Un dels paràmetres a tenir en compte en el disseny dels motors és el seu rendiment. Per tal que les pèrdues siguin mínimes un dels principals mètodes és augmentar la tensió a les fases de tal manera que el corrent sigui el mínim possible i així reduïm la pèrdua d'energia en forma de calor per efecte Joule:

$$(4) \quad P = R * I^2$$

És per això que s'opta per utilitzar un inversor de la marca emDrive i model H300¹ i una configuració de bateria amb una tensió de aproximadament 400V i un corrent màxim que per igualar la potència màxima de 75kW serà de 187.5A. Després de fer un anàlisi del mercat de bateries s'opta per utilitzar cel·les de Liti-Polimer de la marca Kokam que són les que tenen una densitat d'energia més gran del mercat i ens permeten uns corrents de descàrrega suficients per als nostres requisits. La taula següent mostra els paràmetres finals de la bateria.

Dades cel·la

Tensió Cel·la	3,7	V
Capacitat Cel·la	27000	mAh
Energia específica	508,6972462	kWh/m3
Alçada	272	mm
Amplada	95	mm
Profunditat	7,6	mm
Pes	383	g
Densitat energia	260,8	Wh/kg
C descarrega continu	2,0	C
C descarrega màxim	4,0	C

Dades bateria

Serie	108	s
Paral·lel	2	p
Tensió total	399,6	V
Capacitat total	54,0	Ah
Volum total	0,042	m3
Pes total	82,728	kg
Corrent continuu	108	A
Corrent nominal	216	A
Potència nominal	43,1568	kW
Potència màxima	86,3136	kW

Rendiments

Bateria	0,9
Inversor	0,96
Motor elèctric	0,9
Corretja	0,98

Energies

Energia total bateria	21,6	kWh
-----------------------	------	-----

¹ Veure Annex 2 – Datasheet emDrive H300

Energia útil bateria	16,4	kWh
Distància màxima	151,3	km
Pesos		
<i>Pes bateria</i>	82,728	kg
<i>Pes inversor</i>	7,5	kg
<i>Pes motor</i>	20	kg
<i>Total</i>	110,228	kg

Taula 5. Càlculs bateria

5.3.2. Transmissió

La transmissió ha de donar resposta a dos característiques molt importants per l'usuari de la motocicleta com són l'acceleració i la velocitat màxima d'aquesta. Per tal de reduir al màxim el pes i augmentar l'eficiència del conjunt s'ha optat per dissenyar una transmissió directa per corretja.

Com es veurà posteriorment el motor tindrà una velocitat de gir màxima de 7000 min^{-1} . Tenint en compte aquest valor i el radi de la roda, s'ha obtingut la relació de transmissió per tal de poder arribar a una velocitat màxima de més o menys 250 km/h . Aquesta correspondrà a una relació de reducció de 3,33.

$$(5) \frac{7000 \text{ min}^{-1} * 60 * 2 * \pi * 0.3149}{\frac{60}{18} * 1000} = 249.5 \text{ km/h}$$

Aquesta velocitat, es veurà reduïda lleugerament per la fricció amb el vent segons el gràfic següent deixant una velocitat màxima lleugerament superior als 240 km/h .

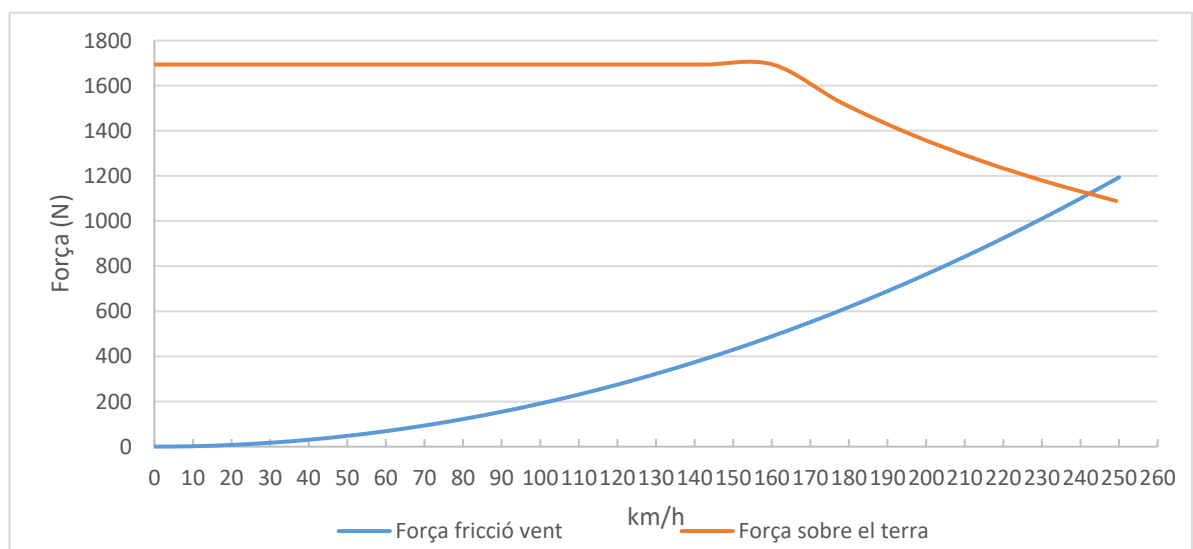


Figura 3. Força fricció amb aire

L'acceleració de la motocicleta va lligada a la força de contacte entre la roda i el terra. Com s'ha vist anteriorment aquesta força en el cas de la motocicleta de partida va variant en funció de la marxa entre 3100 i 1200 N de valor màxim. Per tal de determinar la millor opció per la nostra transmissió directa s'ha fet un càlcul simplista de la força de fricció amb el terra en la situació en que s'utilitzarà la motocicleta en qüestió, carreteres interurbanes en condicions de desgast notable degut al pas de camions i altres vehicles pesats.

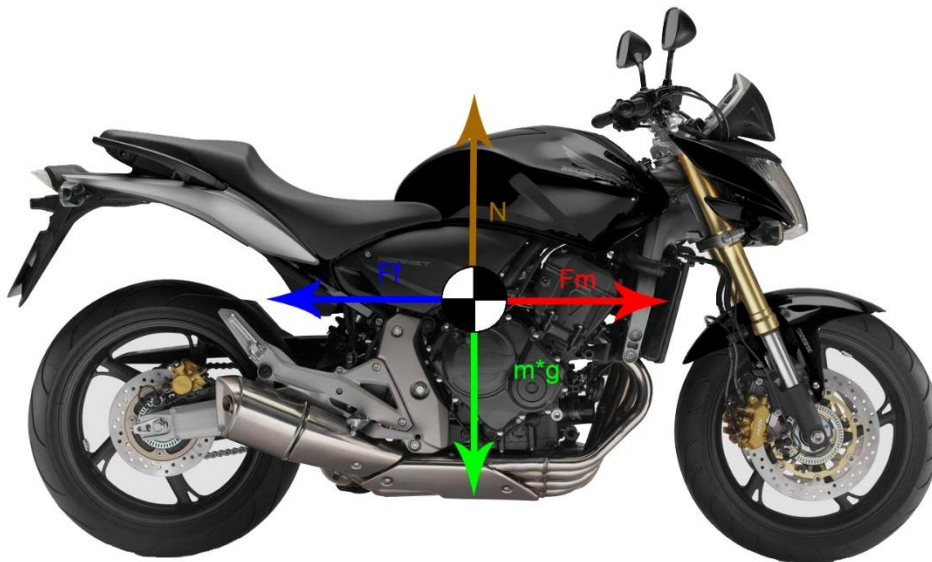


Figura 4. Forces

La situació límit és quan la roda comença a lliscar respecte al terra, és a dir que F_m és igual a F_f . Tenint en compte la massa de la motocicleta sumada a la massa del pilot que sumen uns 270 kg s'han avaluat dues situacions. El cas més desfavorable, amb un repartiment de forces normals al terra similars, i el cas en que la roda davantera s'aixeca del terra i per tant tota la massa es suportada per la roda posterior de la motocicleta. En ambdós casos s'ha agafat un coeficient de fricció amb el terra de 0.8 equivalent al màxim per velocitats inferiors a 50 km/h en carreteres asfaltades amb el paviment usat².

Cas 1:

$$(6) F_f = F_t$$

$$F_m = N_1 * \mu = m_1 * g * \mu = (270 * 0.5) * 9.81 * 0.8 = 1059.48 \text{ N}$$

Cas 2:

²

<https://www.causadirecta.com/especial/calculo-de-velocidades/tablas/tabla-de-factores-de-rozamiento-del-pavimento-para-neumaticos-de-goma>

$$Fm = N1 * \mu = m1 * g * \mu = 270 * 9.81 * 0.8 = 2118.96 \text{ N}$$

A partir del valor decidit pel parell del motor en l'apartat següent, tenim una força al terra amb la transmissió directe de 1693 N. Amb aquest valor obtenim una corba de parell a la roda bastant similar a la que tindríem amb la motocicleta de partida, perdent una mica de força amb les dues primeres marxes entre els 20 i els 150 km/h.

Degut al tipus de conducció de l'usuari principal s'ha decidit que aquesta pèrdua és més que acceptable ja que usualment no condueix la motocicleta en revolucions superiors a les 7000 min⁻¹ amb l'accelerador a fons que seria el moment en que es superaria la força del motor elèctric. En el gràfic següent es mostra el parell a la roda en funció de la velocitat de la motocicleta per als diferents tipus de transmissió. "Direct drive" fa referència a la transmissió directa objectiu d'aquest projecte i les marxes a la motocicleta de combustió. Es pot comprovar que si tenim en compte el valor de parell màxim que es pot fer al contacte amb el terra, en primera i segona marxa superem en excés aquest valor i per tant la roda patinaria.

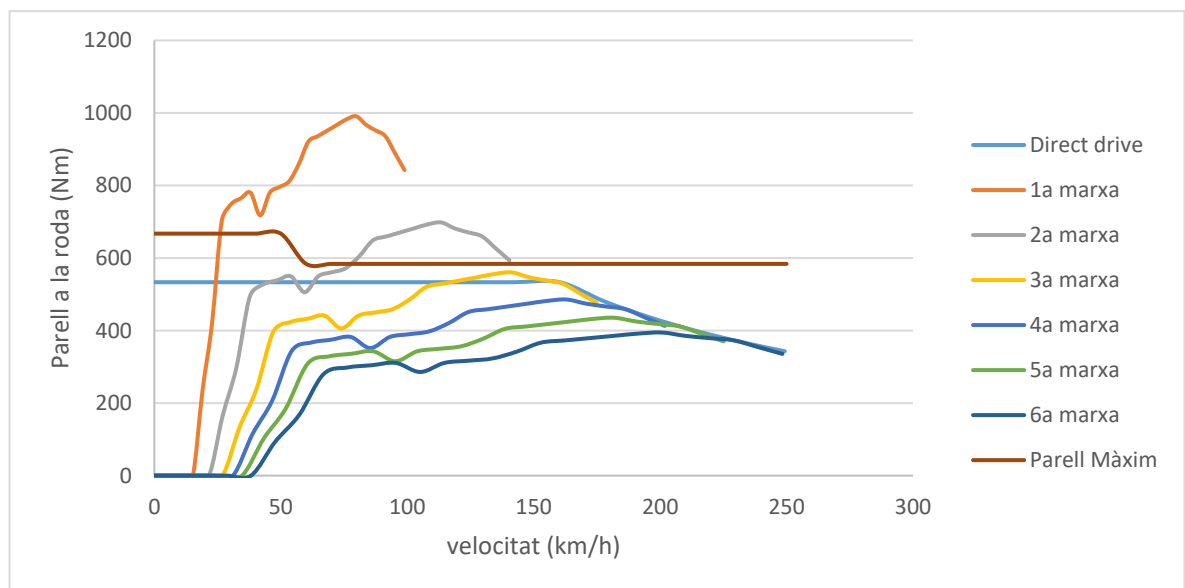


Figura 5. Parell a la roda vs Velocitat

Un altre factor per prendre aquesta decisió és el càlcul d'acceleració 0-100 km/h. Si tenim en compte que la força màxima que podem fer sobre el terra és molt inferior al màxim en la primera marxa (3146 N > 2118.96) i que tant la fase de deixar anar l'embragatge quan surts com la de canviar de marxa requereixen un temps extra queda que:

$$(7) v = v_0 + \frac{F}{m} * t$$

Utilitzant en un cas la força màxima en primera marxa i en l'altre la força màxima elèctrica

obtenim el següents valor de temps d'acceleració.

Tipus	Temps 0-100 km/h
<i>Combustió</i>	3.5 s (+ desembragatge i canvi de marxa)
<i>Elèctric</i>	4.4 s

Taula 6. Comparativa Acceleració

5.3.3. Motor

Els motors elèctrics poden ser de corrent continu o corrent altern i dins d'aquest segon grup de corrent monofàsic o trifàsic. Una altre classificació són el “*brushless*” i els motors amb delgues. En aquest projecte, per tal de maximitzar l'eficiència i la densitat d'energia s'ha optat per dissenyar un motor PMSM. Aquest tipus de motor és síncron *brushless* d'imants permanents i té una corba de parell versus velocitat molt constant cosa que permet un control molt exacte de l'entrega de parell.

El motor ha de complir dos requisits, el de parell i el de potència. En el cas dels motors elèctrics tenim el que s'anomena potència i parell nominals, dintre els quals el motor pot funcionar de forma indefinida i el parell i potència màxims que es poden assolir durant un interval de temps determinat. El paràmetre limitant en el funcionament del motor és la temperatura de desmagnetització dels imants que està al voltant dels 80-100°C.

La potència màxima escollida pel motor és la mateixa que en el cas del motor de combustió, 75,4 kW i el parell màxim serà de 160 Nm. S'hauran de poder donar aquestes condicions durant un període de 11 segons, el temps aproximat per anar de 0 km/h fins a la velocitat màxima de la motocicleta.

En base a l'estudi comparatiu fet es decideix que la potència nominal i el parell nominals seran de 40kW i 80Nm respectivament, aproximadament la meitat del màxims. En el gràfic següent es pot veure el parell desenvolupat pel motor. Aquest és constant durant tot el rang de revolucions fins que queda limitat per la potència, moment en que baixa de forma progressiva. En el punt de velocitat màxima tenim una força a la roda d'aproximadament 500N que s'igual a la força de fricció amb l'aire.

A nivell dimensional el motor ha de complir una condició de diàmetre màxim per permetre l'encaix entre tots els components de la motocicleta. Aquest diàmetre serà de 230 mm. A nivell elèctric haurà de complir que la tensió nominal haurà de ser la mateixa que la de la bateria ja que l'inversor no pot donar més tensió que aquesta.

Per tal de complir amb la velocitat màxima de la motocicleta, el motor girarà fins a un màxim

de 7000 min⁻¹.

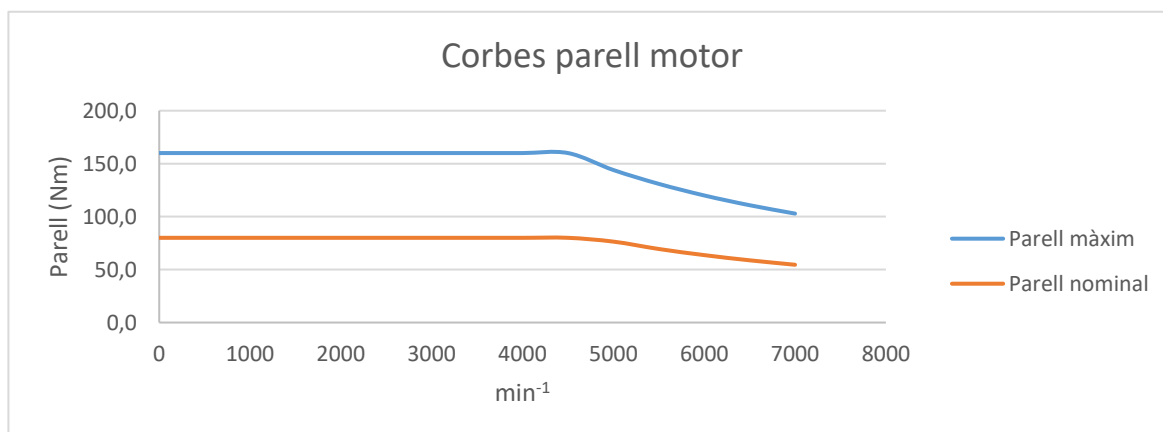


Figura 6. Corba Parell motor

5.3.4. Resum d'especificacions del motor i transmissió

En la taula següent es poden veure les decisions d'especificacions prèvies al disseny per al motor i la transmissió.

Motor

Potència nominal

40 kW

Potència màxima

73,5 kW

Parell nominal

40 Nm

Parell màxima

80 Nm

Diàmetre màxim

230 mm

Voltatge nominal

~400 V

Max RPM

7000 min⁻¹

Transmissió

Tipus

Directa per corretja

Potència màxima

73,5 kW

Relació de reducció

3,33

Dents politja entrada

18

Dents politja sortida

60

Taula 7. Especificacions

6. Disseny del motor

Per tal de complir les especificacions, s'ha fet un estudi previ al disseny en 3D per tal de dimensionar el motor a nivell elèctric i mecànic. Aquest motor serà del tipus “*inrunner*”, és a dir que tindrà el rotor a l'interior i l'estator serà fixe i contindrà el debanat.

6.1. Paràmetres elèctrics

6.1.1. Esquema de connexió

Un dels paràmetres més importants a tenir en compte en el disseny dels motors és la força electromotriu generada sobre el debanat per la rotació del rotor. Com s'ha dit anteriorment el motor serà trifàsic d'imants permanent. En el cas dels sistemes trifàsics, les carregues poden estar connectades en estrella o en triangle. La connexió en estrella permet una relació corrent-parell més gran que en el cas de la connexió en triangle, però per contra, al tenir una tensió entre fases inferior el motor no pot agafar velocitats de gir tant altes per una mateix número d'espores en el debanat. Per altre banda la connexió en triangle permet tenir una relació entre la quantitat de coure en el debanat i la potència més bona que la connexió en estrella.

En aquest projecte s'ha optat per dimensionar el motor amb una configuració en triangle tal com la de la figura següent.

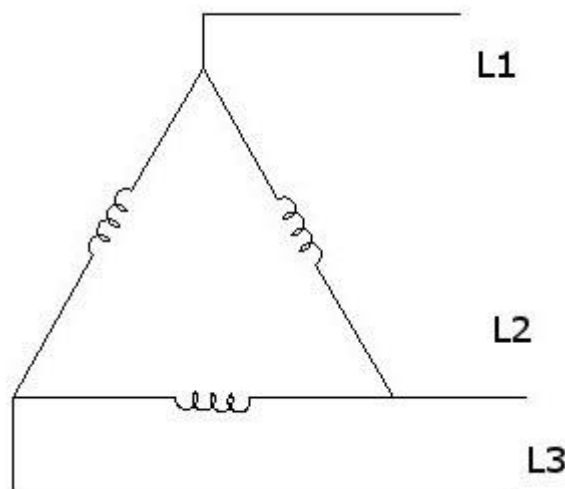


Figura 7. Connexió en triangle

6.1.2. Intensitat nominal del motor

En base a la connexió del debanat, podem estimar el corrent necessari per a donar els 40 kW

de potència nominal. Hem de tenir en compte que la tensió en continua passa a ser alterna amb una amplitud de 400V de pic.

$$(8) \quad I_N = \frac{P}{\sqrt{3} * V * FP} = \frac{40000}{\sqrt{3} * \frac{400}{\sqrt{2}} * 0.95} = 86 \text{ A}$$

6.1.3. Número de pols i dents

Una altre decisió de disseny per als motors elèctrics són el numero de pols magnètics del rotor i dents de l'estator. En aquest cas s'ha optat per una configuració de 20 pols i 24 dents de l'estator. Aquesta decisió s'ha pres en base a estudis realitzats d'eficiència i de densitat de parell que podeu trobar a la bibliografia del treball [5].

Un cop decidit el número de pols i dents, mitjançant l'eina online "*Winding scheme calculator*"³ s'ha trobat la distribució del debanat per cada fase. Tot i que en la figura 8 es mostra com si fos un motor amb el rotor exterior la distribució del debanat no canvia pel motor amb rotor interior.

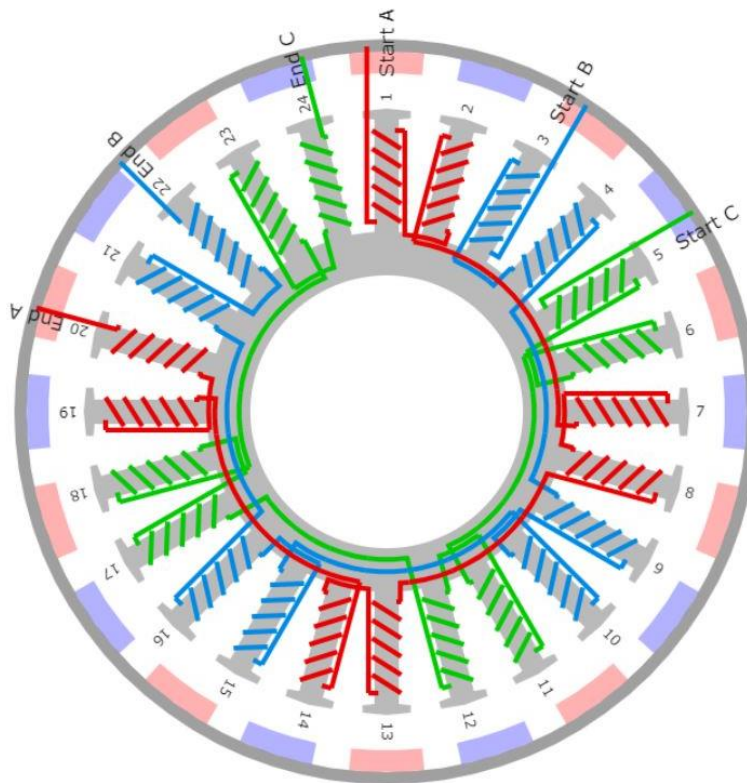


Figura 8. Imatge distribució del debanat

³ <http://www.bavaria-direct.co.za/scheme/calculator/>

Aquest debanat, tal i com diu a l'aplicació, tindrà un factor de 0.93, que fa referència a la eficiència del debanat pel fet de no estar situat tot en la posició òptima respecte el camp magnètic i la dent de l'estator i ens servirà per calcular l'àrea de debanat.

6.1.4. Velocitat de rotació del camp magnètic

En els motors PMSM, la velocitat de rotació del motor va sincronitzada amb la velocitat de rotació del camp magnètic. La relació que hi ha entre un i l'altre depèn del nombre de pols segons la fórmula:

$$(9) \quad \text{Freqüència CM } f = N^{\circ} \text{ pols} * \frac{RPM_{\text{rotor}}}{120} = 20 * \frac{7000}{120} = 1167 \text{ Hz}$$

Aquesta freqüència es correspon a unes 70000 min⁻¹ del camp magnètic. Per tant, la relació que hi haurà entre la velocitat del camp magnètic i la velocitat del rotor és de 0,1.

6.1.5. Àrea de debanat

En base a la tensió màxima del sistema i la velocitat a la que volem arribar s'ha calculat a partir de la fórmula de la força electromotriu el nombre d'espores de cada dent del motor.

$$(10) \quad N = \frac{3 * 50 * V * k * k_1}{2,22 * \phi * f * E * k_2} = \frac{3 * 50 * 283 * 1 * 1}{2,22 * 0,14 * 1167 * 0,93 * 1} \cong 6 \text{ espores}$$

Donat que el corrent màxim que pot passar pel conductor és de 4.1 A/mm² i que volem fer passar un corrent de 86 A necessitem cables de 4 AWG amb una àrea de 21,2 mm², que multiplicat pels 6 conductors ens porten a una àrea total del debanat de 127,2 mm².

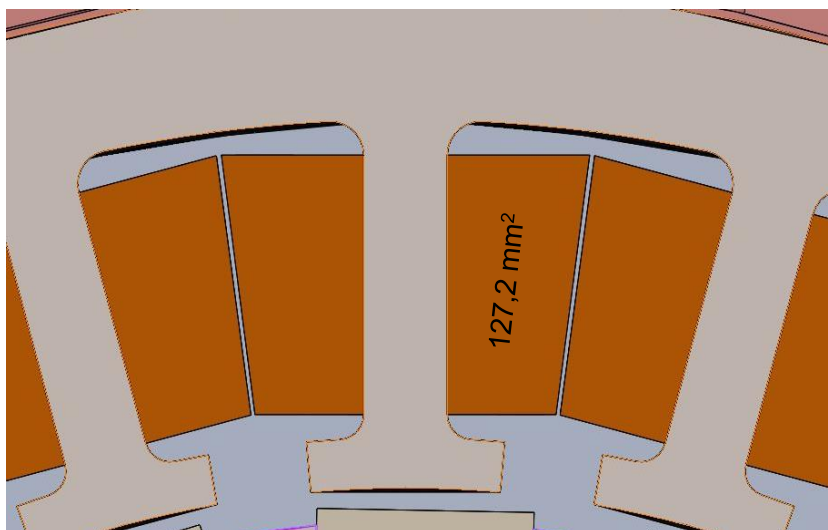


Figura 9. Debanat

6.1.6. Encoder

Per tal de tenir una mesura de la posició del rotor respecte l'estator, cosa indispensable per al control del motor, s'ha d'instal·lar un sensor de posició angular. En aquest cas, es farà servir un encoder òptic de la marca Baumer. Aquest, mitjançant un feix de llum a través d'un codificador absolut, envia mesures de la posició angular amb una resolució de 16 bits de tal manera que es podrà seguir el camp magnètic de forma precisa.



Figura 10. Encoder Baumer

6.2. Paràmetres mecànics

Els principals paràmetres a la hora del disseny mecànic que afecten al funcionament del motor són el diàmetre intern i la longitud del camp magnètic. Augmentant la longitud del camp magnètic s'augmenta la força que es fa entre els camps magnètics de l'estator i el rotor i augmentant o disminuint el diàmetre, per un costat permet augmentar o disminuir el radi, el que causa una modificació del parell i per altre banda permet muntar imants més o menys grans, el que permetrà també augmentar o disminuir la força magnètica.

A més d'aquests paràmetres, s'han de tenir molt en compte tant l'amplada de les dents com la distància de l'entreferro.

Com es veurà en l'apartat 6.5, per tal d'estudiar les diferències de funcionament entre els diferents paràmetres s'ha fet un model parametritzat que permetrà fer canvis de forma fàcil entre els diferents models i opcions per després simular-ho i extreure'n conclusions.

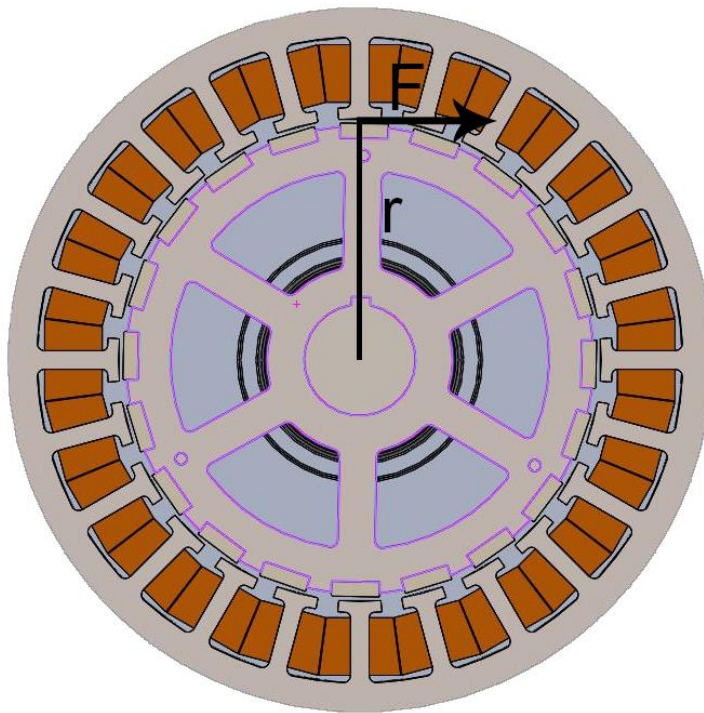


Figura 11. Força magnètica

Després de fer les simulacions amb diferents radis i llargades s'ha optat per tenir un radi de 75,5mm i una longitud d'imant de 12cm. D'aquesta manera mantenim les dimensions del motor al mínim a la vegada que tenim espai per situar tots els pols i dents necessaris.

Per tal que no es saturi el flux magnètic a l'estator en fer passar el corrent pel debanat, s'ha escollit una amplada de dent de 5mm. El gruix de l'entreferro, després de fer simulacions amb diferents gruixos s'ha decidit deixar-lo a 1mm

Mitjançant el càlcul de l'àrea del debanat de l'apartat anterior, hem pogut dimensionar el diàmetre final de l'estator amb l'objectiu d'encabir tot el debanat. Aquest queda en 190mm

6.2.1. Càlcul diàmetre de l'eix

Per tal de que l'eix aguantí els esforços als que estarà sotmès s'ha fet el càlcul següent a partir de les fórmules proporcionades per ABB per al càlcul d'eixos⁴:

$$(11) \quad D = \sqrt[3]{\frac{1.33 \cdot 10^6 \cdot P}{N}} = \sqrt[3]{\frac{1.33 \cdot 10^6 \cdot 75,4 \text{ kW}}{7000 \text{ rpm}}} = 24.28 \text{ mm}$$

⁴ <https://www.baldor.com/our-profile/news/company-news/detail?id=%7B99267A2B-3271-4746-9ECD-0A7AEB0DDD82%7D>

Finalment s'ha escollit un diàmetre de 25mm per tal de augmentar el coeficient de seguretat.

6.2.2. Càlcul dels rodaments

Per tal de simplificar el sistema, s'ha optat per fer servir dos rodaments de contacte angular muntats en X. D'aquesta forma podrem posar un tensor extern i la part interior del motor serà molt simple.

Els esforços que han de suportar els rodaments són, principalment, les forces provocades per l'entrega de parell. En la següent figura es veuen representades aquestes forces.

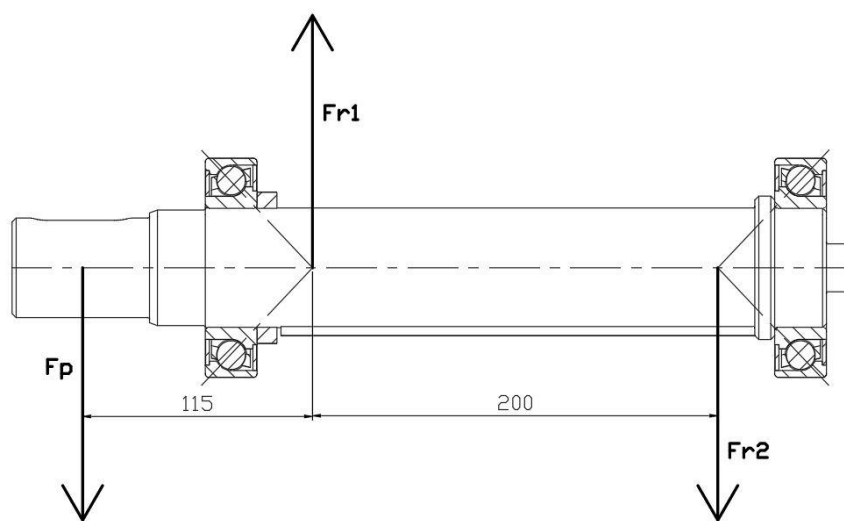


Figura 12. Esforços sobre l'eix

Igualant forces i moments tenint en compte el parell màxim entregat pel motor obtenim:

$$(12) \quad \begin{cases} F_p = Fr_2 - Fr_1 \\ F_p * 115 = Fr_2 * 200 \end{cases}$$

Sabem que la força màxima que haurà de fer la corretja és de 5600 N, per tant $F_p = 5600$ N,

$Fr_2 = 3220$ N i $Fr_1 = 2380$ N

Per tal de complir amb aquests valor i mantenir un coeficient de seguretat elevat, tenint en compte que no s'ha calculat la tensió deguda al pre-muntatge de la corretja s'han seleccionat uns rodaments del tipus 7006 amb una tensió radial màxima dinàmica de 19000 N.

6.3. Refrigeració

Tot i que no s'ha treballat en detall durant aquest projecte i es deixa per futurs estudis, el disseny del motor s'ha fet pensant en incloure un sistema de refrigeració. Aquest estarà conformat per tres tubs de coure que envoltaran l'estator i extrauran la calor d'aquest cap a l'exterior on hi haurà un radiador per refredar el líquid calent.

6.4. Selecció de materials

En aquest apartat es descriuen de forma abreujada el conjunt de materials seleccionats per a cada un dels elements principals del motor

6.4.1. Imants

Els imants són una de les peces claus per al disseny ja que aporten un dels camps magnètics necessaris per a fer la força per fer girar el motor. En funció de la densitat d'energia que té cada imant, paràmetre que depèn del material, et permet fer més força o menys.

Per tal de fer el motor el més compacte possible, s'ha optat per uns imants de tipus NdFeB 52 MGOe és a dir, per uns imants de neodimi que actualment tot i ser els més cars són els que tenen més densitat d'energia i permeten arribar a uns flux magnètics molt més grans abans de desmagnetitzar-se. Aquest imants tenen una temperatura màxima de treball de 100 °C i una temperatura de Curie de 300 °C.

6.4.2. Estator

L'estator estarà fet amb laminacions de acer M15 especial per components elèctrics laminat en làmines d'1mm de gruix amb un factor d'empaquetament de 0,95. Aquest acer és un aliatge amb silici que permet reduir els corrents d'Eddy i la histèresis del material.

6.4.3. Rotor

En el rotor s'ha fet servir acer baix en carboni 1018. Aquest acer té molt bon balanç entre resistència, duresa i mal-leabilitat. És un material molt bo per a fer mecanitzats.

6.4.4. Eix motor

L'eix del motor estarà mecanitzat sobre una barra d'acer laminat en fred SAE 1045. És el material més usat a nivell industrial per a fer eixos de motors elèctrics.

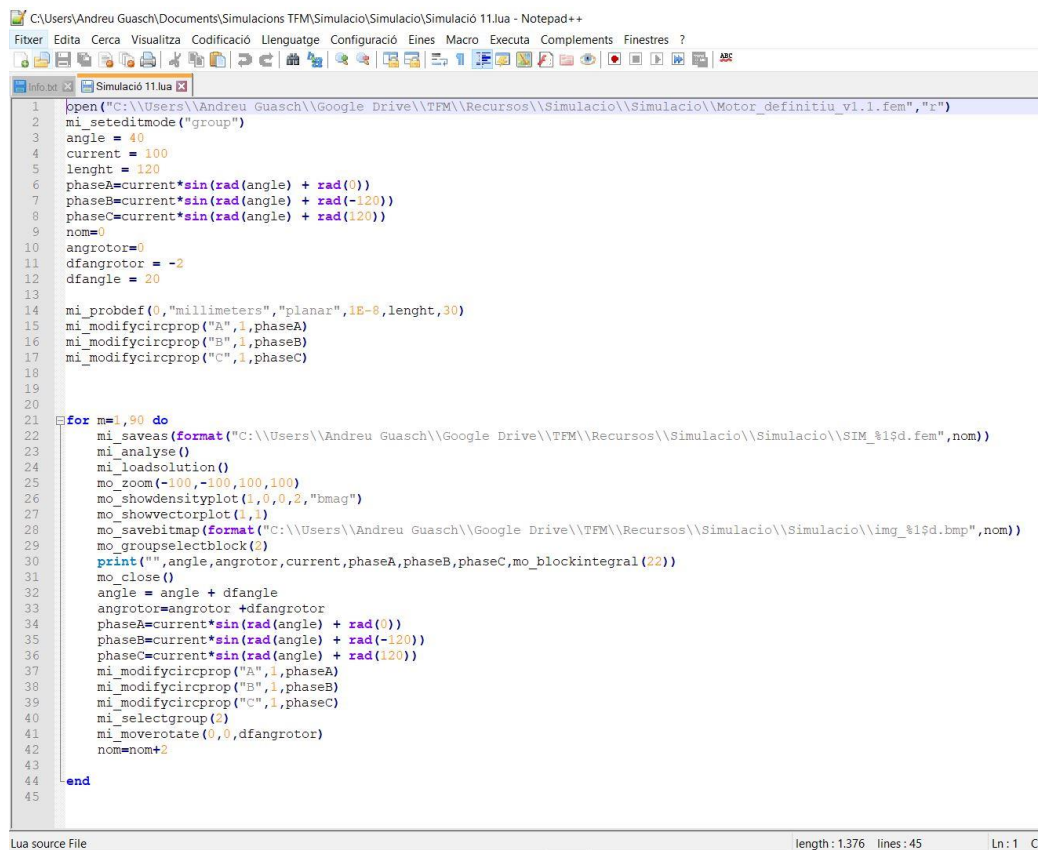
6.4.5. Carcassa

La carcassa estarà feta en alumini 6082 mecanitzat. D'aquesta manera aconseguirem minimitzar el pes del conjunt.

6.5. Simulació

Tal i com s'ha comentat a l'apartat 6.2, s'ha fet part del disseny amb l'ajuda d'un simulador que ha permès comparar l'impacte de diferents opcions de disseny. Per fer l'anàlisi comparatiu s'ha fet un disseny factorial fins a trobar la combinació de valors per a cada un dels paràmetres de disseny que donaven el millor comportament. És a dir, un millor resposta del parell en funció de la intensitat al motor.

Amb tal propòsit, s'ha utilitzat el software per al càlcul d'elements finits FEMM. És un software lliure que permet fer càlculs electromagnètics i de transferència de calor. Aquest software permet desenvolupar i executar programes per tal d'automatitzar les simulacions.



```

1  open("C:\\Users\\Andreu Guasch\\Documents\\Simulacions TFM\\Simulacio\\Simulacio\\Simulació 11.lua", "r")
2  mi_seteditmode("group")
3  angle = 40
4  current = 100
5  lenght = 120
6  phaseA=current*sin(rad(angle) + rad(0))
7  phaseB=current*sin(rad(angle) + rad(-120))
8  phaseC=current*sin(rad(angle) + rad(120))
9  nome=0
10 angrotor=0
11 dfangrotor = -2
12 dfangle = 20
13
14 mi_probdef(0,"millimeters","planar",1E-6,lenght,30)
15 mi_modifycircprop("A",1,phaseA)
16 mi_modifycircprop("B",1,phaseB)
17 mi_modifycircprop("C",1,phaseC)
18
19
20
21 for m=1,90 do
22   mi_saveas(format("C:\\Users\\Andreu Guasch\\Documents\\Simulacions TFM\\Simulacio\\Simulacio\\SIM_%1$d.fem",nom))
23   mi_analyse()
24   mi_loadsolution()
25   mo_zoom(-100,-100,100,100)
26   mo_showdensityplot(1,0,2,"bmag")
27   mo_showvectorplot(1,1)
28   mo_savebitmap(format("C:\\Users\\Andreu Guasch\\Documents\\Simulacions TFM\\Simulacio\\Simulacio\\img_%1$d.bmp",nom))
29   mo_groupselectblock(2)
30   print(" ",angle,angrotor,current,phaseA,phaseB,phaseC,mo_blockintegral(22))
31   mo_close()
32   angle = angle + dfangle
33   angrotor=angrotor +dfangrotor
34   phaseA=current*sin(rad(angle) + rad(0))
35   phaseB=current*sin(rad(angle) + rad(-120))
36   phaseC=current*sin(rad(angle) + rad(120))
37   mi_modifycircprop("A",1,phaseA)
38   mi_modifycircprop("B",1,phaseB)
39   mi_modifycircprop("C",1,phaseC)
40   mi_selectgroup(2)
41   mi_moverotate(0,0,dfangrotor)
42   nome=nome+2
43
44 end
45

```

Lua source File length: 1.376 lines: 45 Ln: 1 C

Figura 13. Fitxer de simulació

6.5.1. Geometria

A partir del disseny en 3D s'ha extret la geometria del motor en format DXF. Aquesta s'ha anat modificant per adaptar-la a cada simulació. La geometria s'ha agrupat en dos grups, un per l'estator i un pel rotor de tal manera que es puguin seleccionar per separat per tal de rotar-los. Dins de l'apartat "Problem", s'ha de definir el tipus de problema, l'error màxim i la profunditat de la geometria. Al llarg de les simulacions s'ha anat variant aquest paràmetre per arribar a l'objectiu de parell.

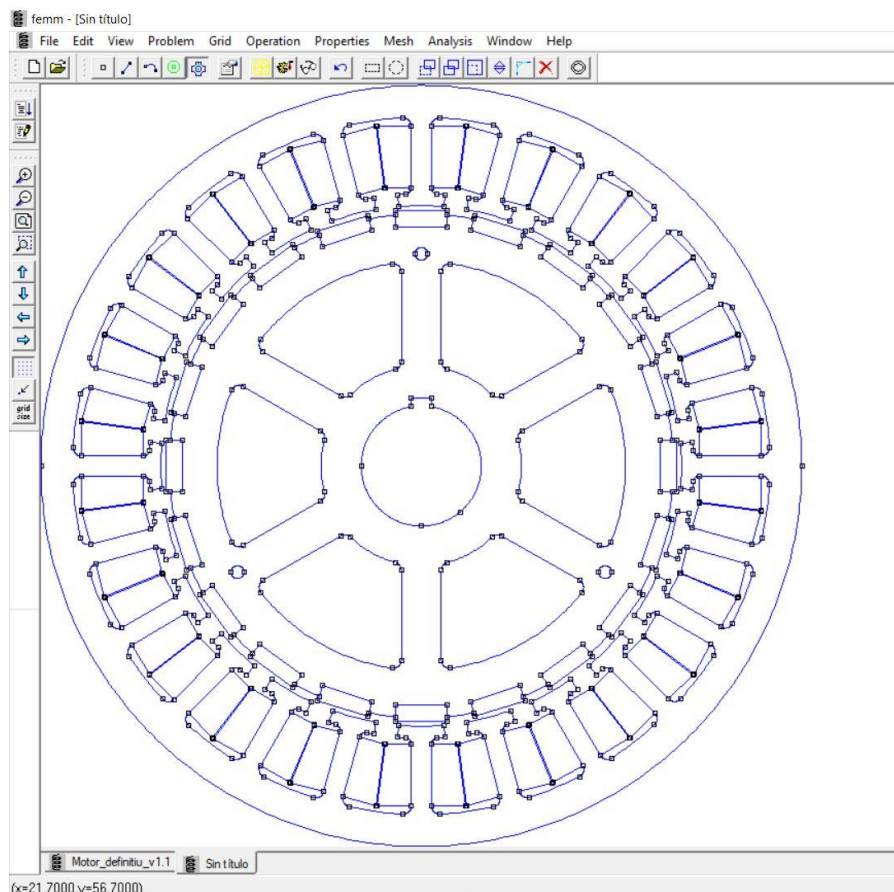


Figura 14. FEMM Geometria

6.5.2. Materials

Dins d'aquest apartat podem distingir dos grups. El material assignat a cada component i el circuit al que correspon. Tal i com es pot veure a la Figura 15 els materials s'assignen, un cop seleccionats a la llibreria de materials, a cadascuna de les superfícies dins d'un entorn tancat.

Els circuits estan definits dins de l'apartat de propietats com a A, B i C corresponents a les fases. Per tal d'indicar la direcció del flux de corrent s'ha de senyalitzar amb un símbol negatiu davant del número d'espises.

Aquests circuits tenen una propietat de corrent mitjançant la qual especifiquem el corrent de cada fase.

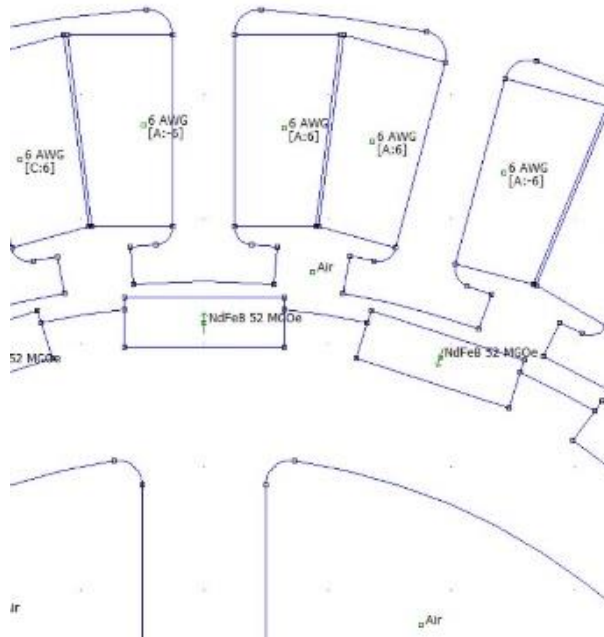


Figura 15. FEMM Materials

6.5.3. Resultats

6.5.3.1. Angle òptim respecte CM i rotor.

Les primeres simulacions han tingut com a objectiu buscar l'angle on es fa més força magnètica. Per a tal efecte, s'ha fet rotar el camp magnètic 360° mantenint fixe la posició del rotor de tal manera que veiem el parell en els dos sentits de gir.

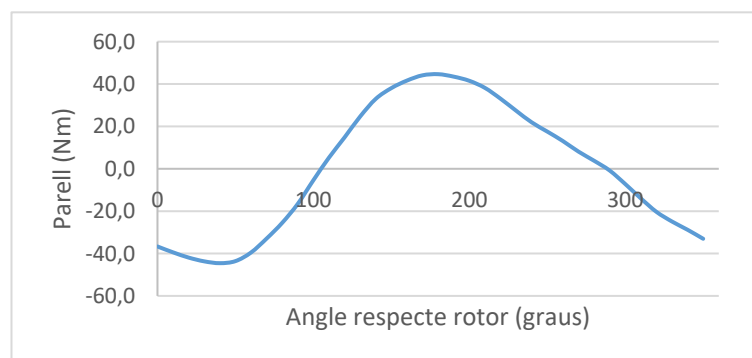


Figura 16. Gràfic angle òptim del CM

D'aquest gràfic podem extreure els punts on el parell és màxim que aproximadament són -40° i 180°. En un cas el parell és en sentit horari i en l'altre cas en sentit antihorari. A partir d'aquí

les següents simulacions es faran en el punt -40° .

6.5.3.2. Optimització de les dimensions

En els dos gràfics següents s'observa, per una banda, les diferències en les corbes de parell versus corrent per diferents longituds i número d'espises de l'estator. Tal i com s'espera es pot veure que a l'augmentar la longitud augmenta el parell de forma proporcional. A l'augmentar el número d'espises, a part d'augmentar el parell de sortida s'obté una corba amb menys pendent cosa que provoca que per corrents elevats el parell no augmenti com en el cas de menys espises.

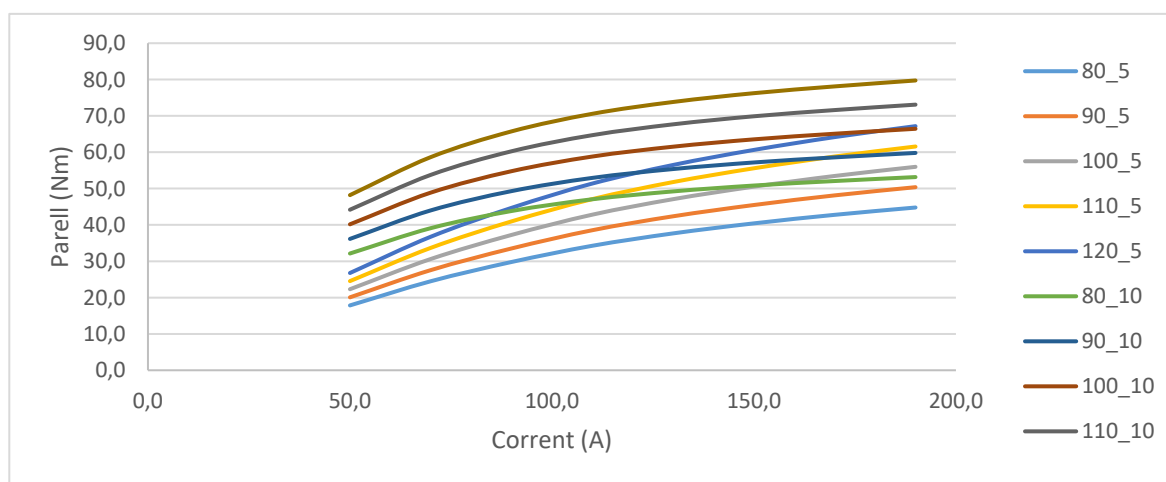


Figura 17. Corbes Parell versus Corrent. ϕ 81 mm a l'entreferro

Per altra banda podem observar les diferències entre diferents diàmetres a l'entreferro i de l'estator. Per tal d'arribar al parell requerit en les especificacions, s'ha augmentat aquest diàmetres.

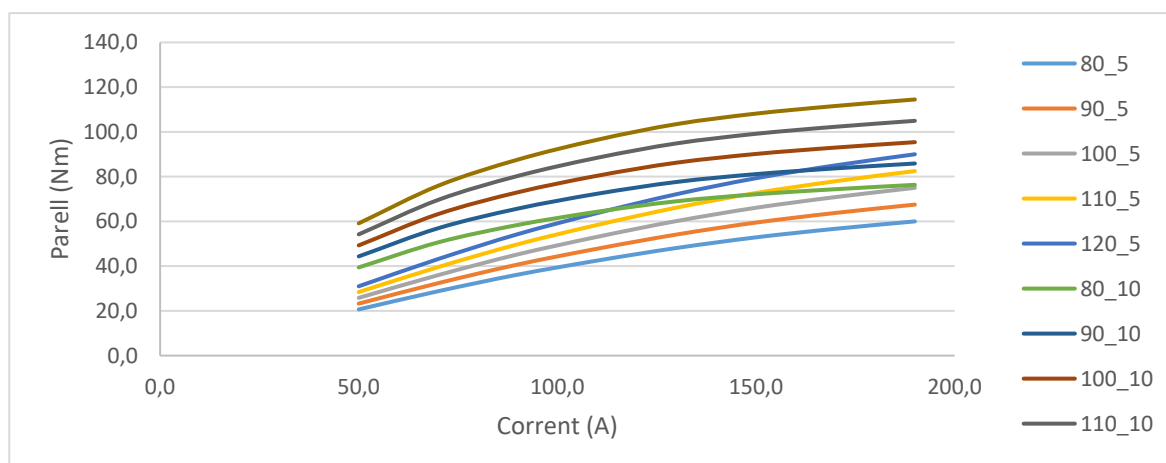


Figura 18. Corbes Parell versus Corrent. ϕ 151 mm a l'entreferro

Finalment s'han fet dos simulacions variant el gruix a l'entreferro amb l'objectiu de veure com afecta aquest paràmetre a la corba de Parell del motor. Tal i com s'observa a la figura 19 com més petit és el gruix a l'entreferro millor resultat s'obté. Això és degut a que la resistència magnètica equivalent depèn exclusivament del gruix de l'entreferro ja que és, en comparació amb les resistències dels materials d'un ordre molt superior.

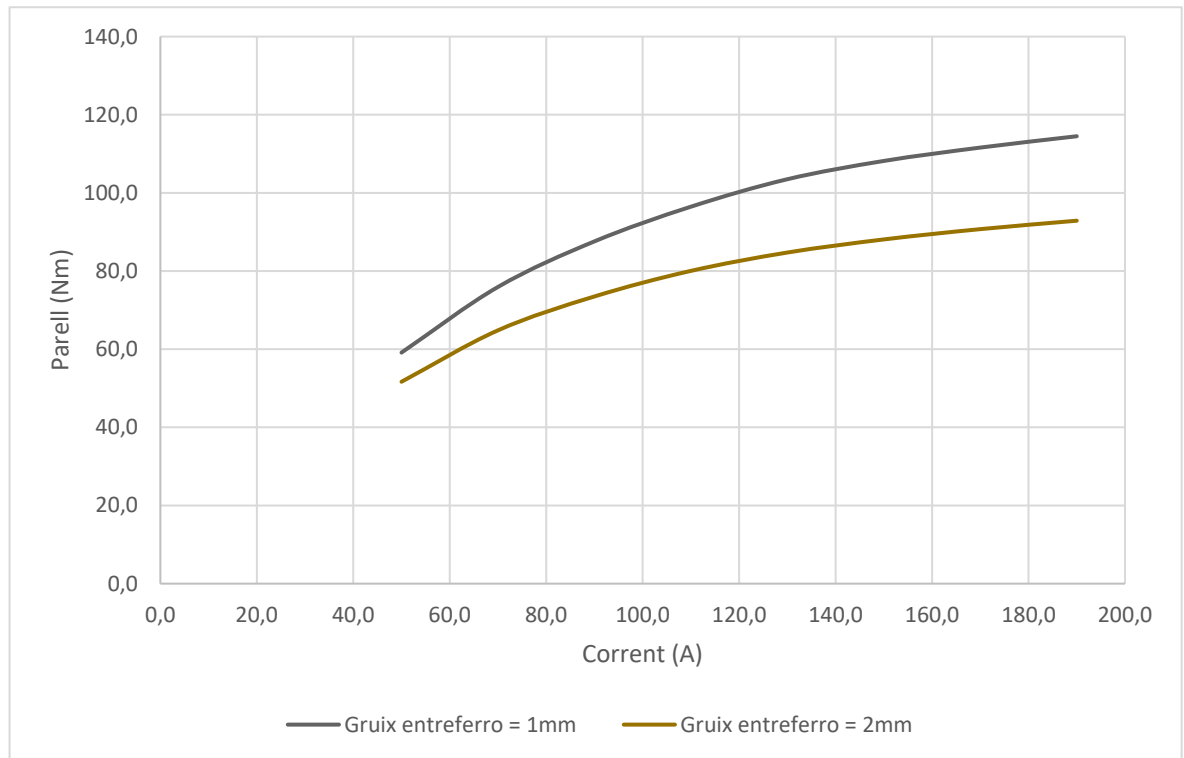


Figura 19. Corbes Parell vs Corrent. Comparació gruix entreferro

6.5.3.3. Corbes motor final

Per tal de comprovar el bon funcionament del motor amb els paràmetres finals s'ha fet la simulació de parell en funció de la intensitat al llarg de tot el rang del motor i una altra simulant una volta completa del rotor a un parell nominal. En aquestes es pot comprovar que el motor compleix els requisits de parell nominal pel corrent estipulat i que és capaç d'arribar al parell màxim. També s'observa la regularitat del parell al llarg de tota una revolució cosa que facilitarà el control del motor i millorarà la seva resposta.

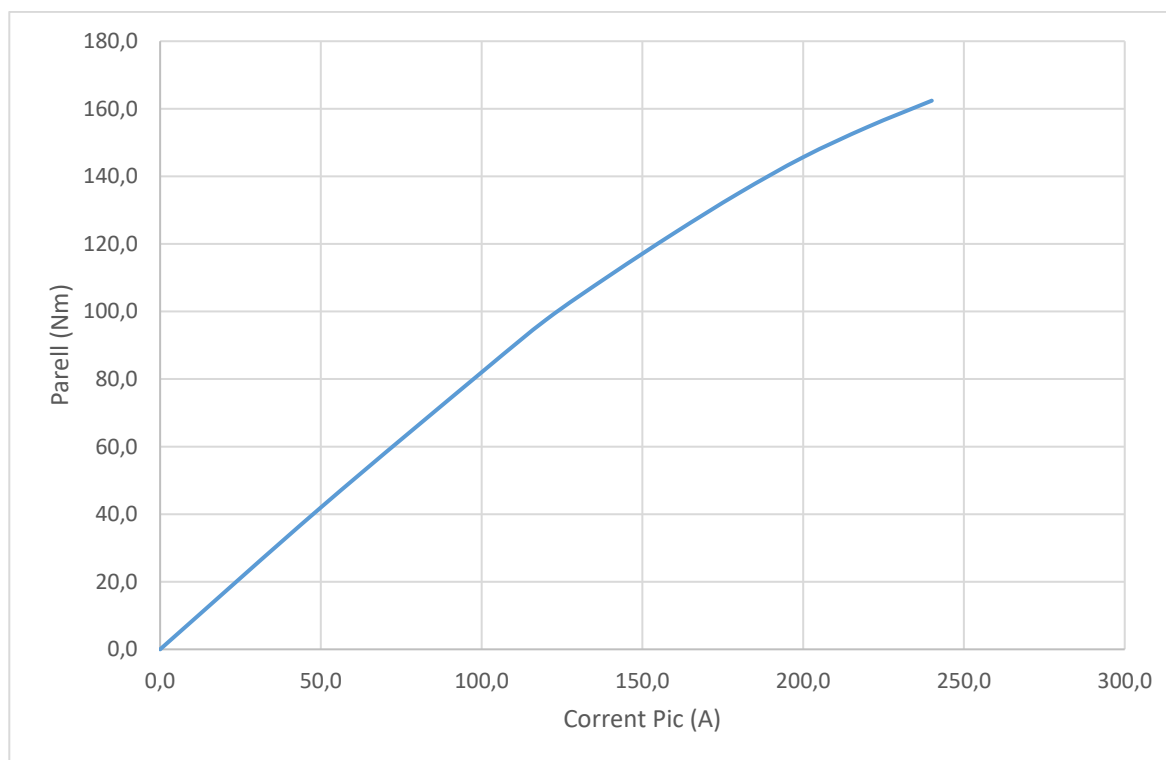


Figura 20. Corba Parell vs Corrent

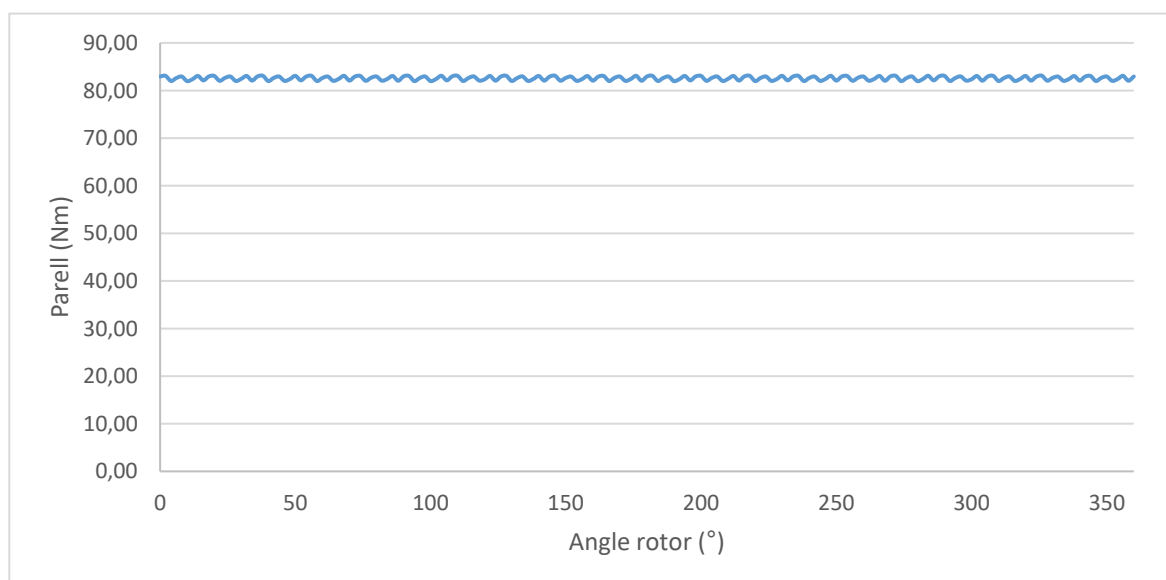


Figura 21. Parell nominal vs Angle rotor

6.6. CAD

Un cop definides les especificacions del motor s'opta, tal i com s'ha comentat amb anterioritat, per fer un disseny que sigui configurable i permeti fer modificacions ràpides per tal de fer les simulacions. A tal efecte s'utilitza el software de disseny Catia V5 de Dassault Systemes. Mitjançant les eines de disseny de sòlids i les d'acoblements s'ha pogut fer un disseny que es pot modificar mitjançant un seguit de paràmetres.

<i>Diàmetre eix sortida</i>	25 mm
<i>Diàmetre eix rotor</i>	30 mm
<i>Longitud eix sortida</i>	40 mm
<i>Longitud eix rotor</i>	120 mm
<i>Amplada del rodament</i>	13 mm
<i>Alçada imant</i>	4 mm
<i>Amplada imant</i>	13 mm
<i>Longitud imant</i>	120 mm
<i>Diàmetre extern del rotor</i>	126 mm
<i>Diàmetre extern imant</i>	128 mm
<i>N pols</i>	20 -
<i>N radis</i>	6 -
<i>Air gap</i>	1 mm
<i>Diàmetre extern estator</i>	190 mm
<i>N dents</i>	24 -
<i>Gruix dents</i>	5 mm

Taula 8 Paràmetres de disseny.

Mitjanant modificacions en aquests paràmetres s'ha pogut dimensionar el motor sense necessitat de tocar el model en 3D.

Les peces que conformen el motor són:

- Rotor
 - Eix
 - Rotor 1 x3
 - Rotor 2 x2
 - Espaiador
 - Imant x20
 - Cargol M3x123 x3

- Femella M3 x3
- Estator
 - Carcassa central
 - Tapa dreta
 - Tapa esquerra
 - Tensor rodament
 - Galga tensor
 - DIN 7984 M4x10 x3
 - DIN 7984 M5x8 x6
 - DIN 912 M5x10 x12
 - DIN 912 M5x16 x16
 - ISO 4162 M8x16
 - Passa murs Euchner x3
 - Retenidor
 - Rodaments x2
 - Sistema refrigeració
 - Coure debanat

6.6.1. Procés de muntatge

A continuació es detalla pas a pas el muntatge del motor començant pel rotor i després el conjunt:

1. Muntar a l'eix les 5 peces del rotor. Les dos peces laterals i la central encaixen amb el passador de l'eix

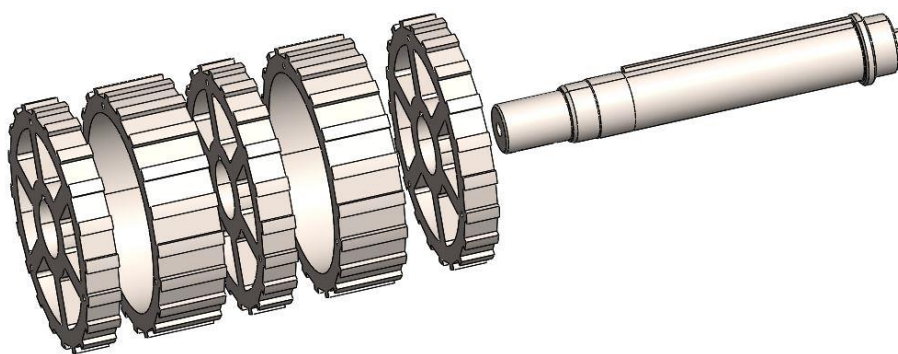


Figura 22. Muntatge, pas 1

2. Col·locar i cargolar els cargols M3x123 i les femelles respectives

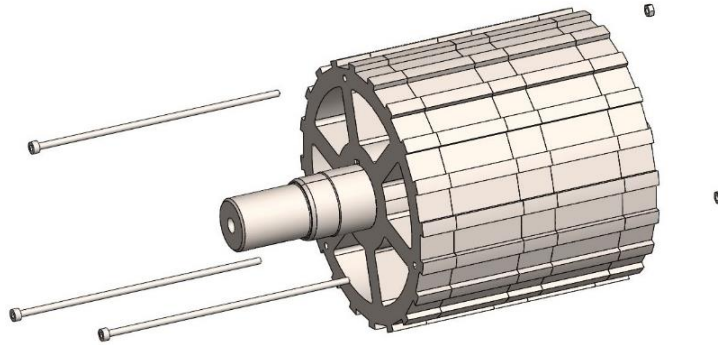


Figura 23. Muntatge, pas 2

3. Muntar l'espaiador de l'eix i els dos rodaments de contacte angular. Un a cada extrem de l'eix.

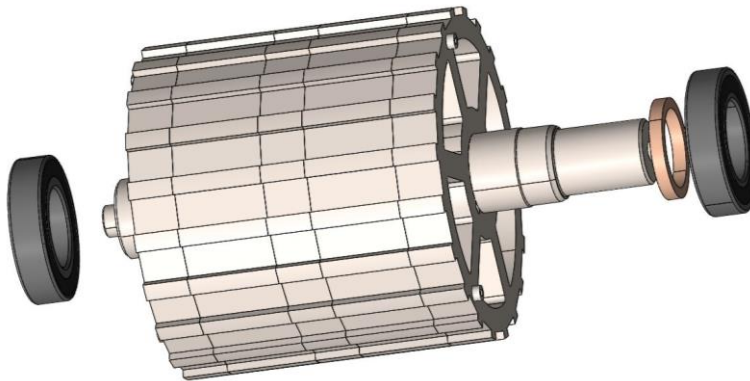


Figura 24. Muntatge, pas 3

4. Enganxar els imants en els seves ubicacions amb adhesiu especial per metalls que tingui una temperatura màxima superior a 100 °C

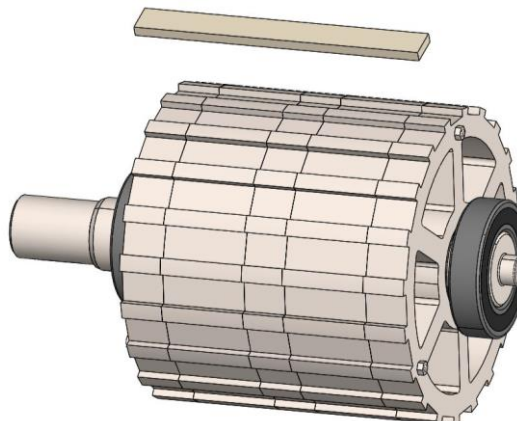


Figura 25. Muntatge, pas 4

5. Posar per la part interior de la tapa dreta els 3 cargols DIN 7984 M4x10

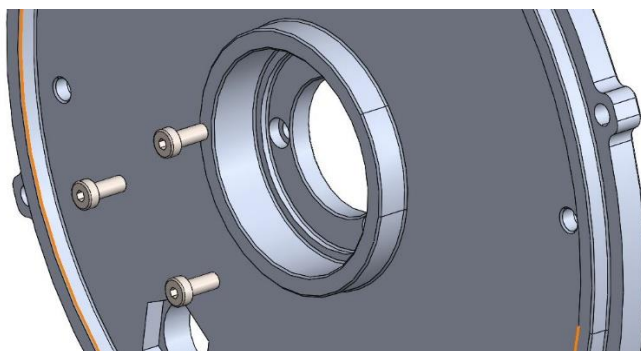


Figura 26. Muntatge, pas 5

6. Per la part exterior de la tapa col·locar l'encoder Baumer i cargolar-lo. La posició de l'encoder és amb el connector de sortida en direcció als tres forats grans dels contactes.

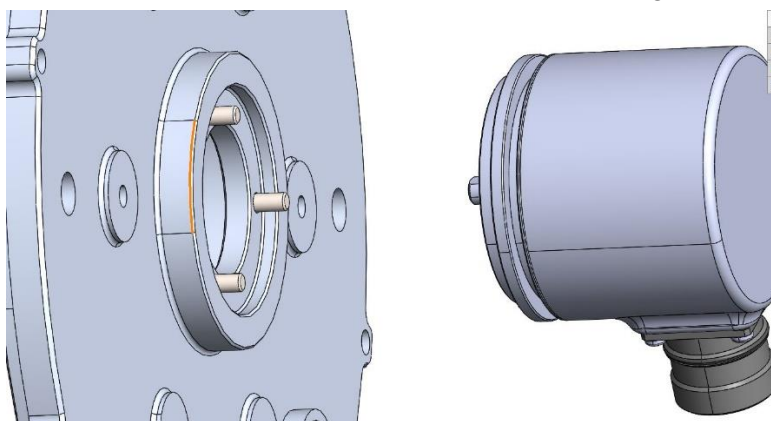


Figura 27. Muntatge, pas 6

7. Després d'haver unit totes les lames de l'estator, col·locar un dels suports a una de les bandes.

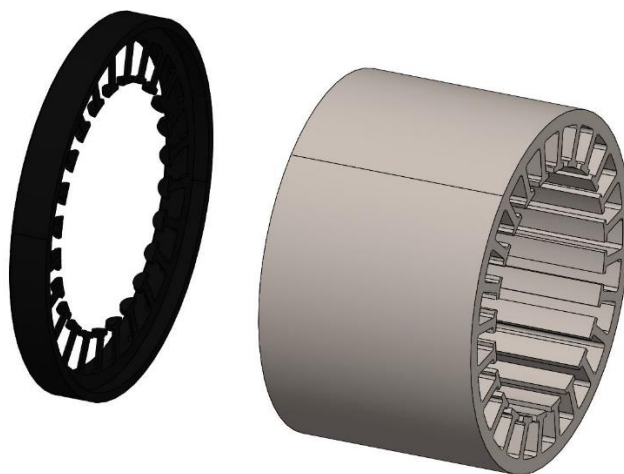


Figura 28. Muntatge, pas 7

8. Inserir els tubs de la refrigeració dins de la carcassa central

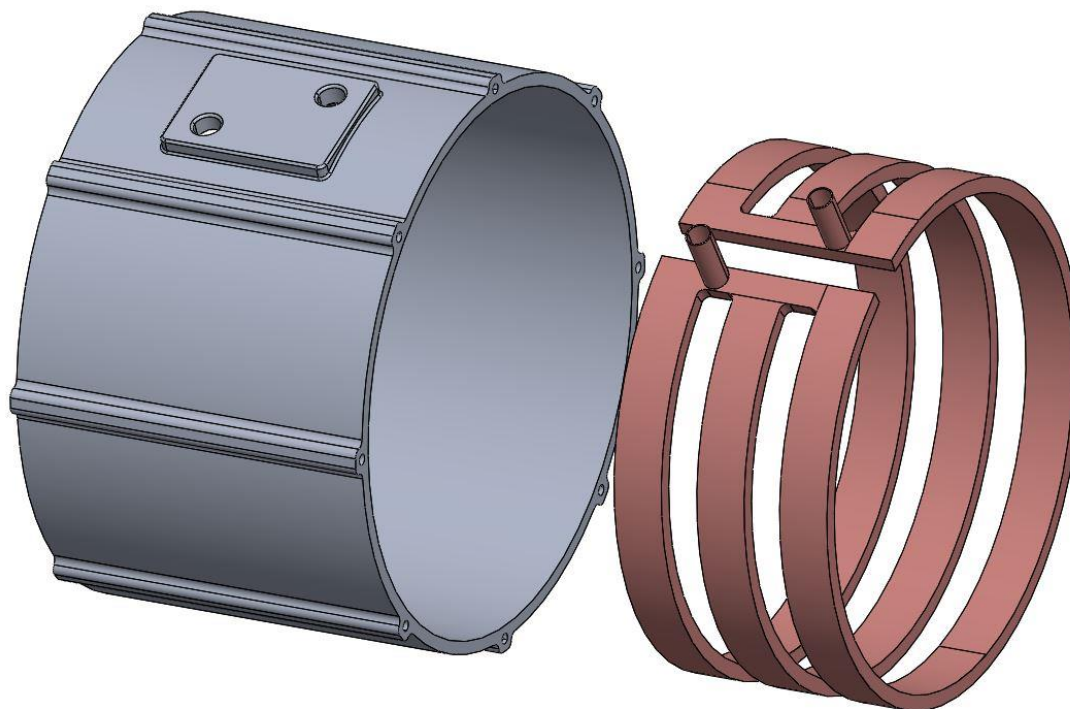


Figura 29. Muntatge, pas 8

9. Inserir l'estator dins de la carcassa central (va ajustat als tubs refrigerants i posar-li el suport que falta).

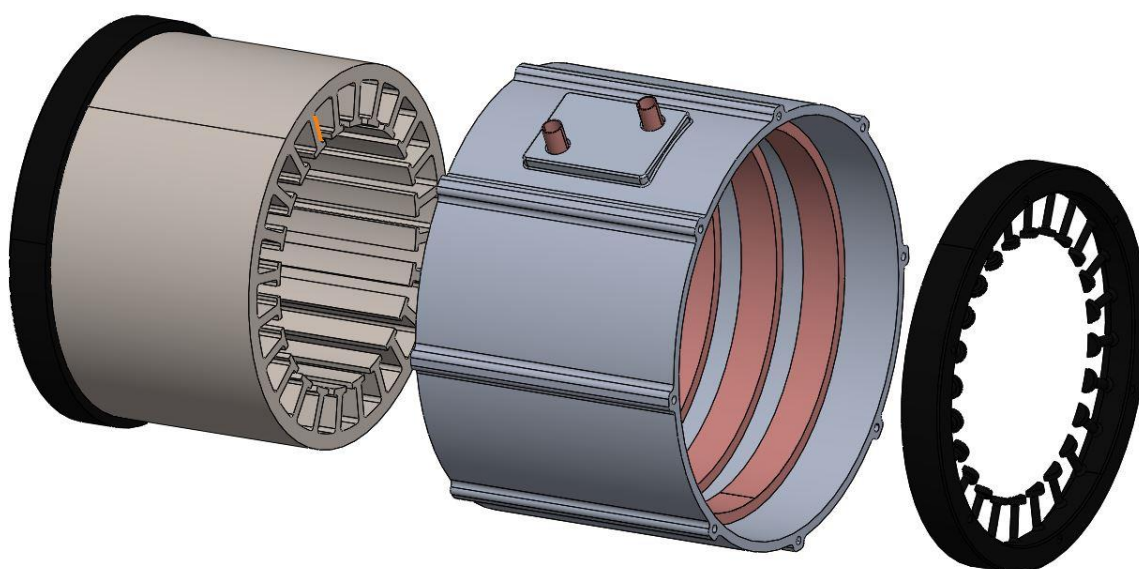


Figura 30. Muntatge, pas 9

10. Fer el debanat del motor seguint l'esquema que hi ha a l'apartat 6.1.3 centrant les tres fases respecte las sortides dels tubs de refrigeració.

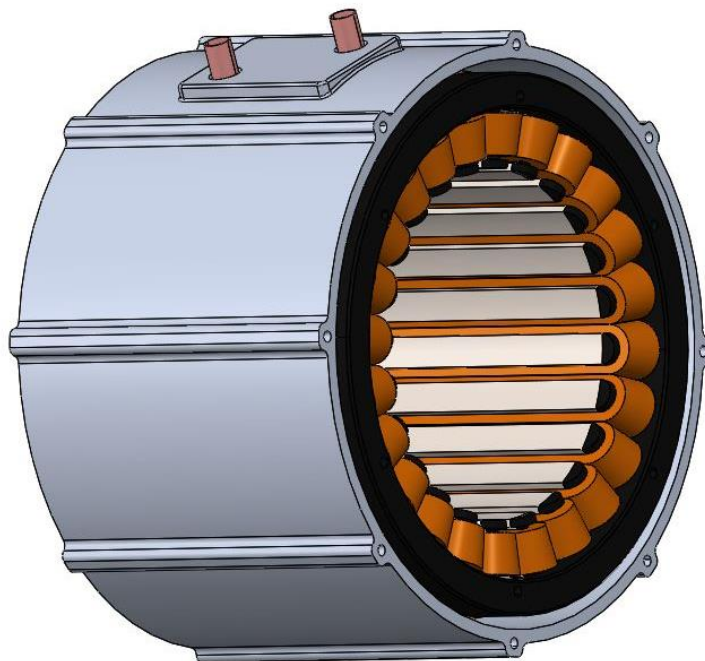


Figura 31. Muntatge, pas 10

11. Col·locar i cargola la tapa de la dreta amb el suport de l'estator, s'han de passar els tres cables de les fases pels passa murs i col·locar aquests a la tapa. Cargols DIN 912 M5x10

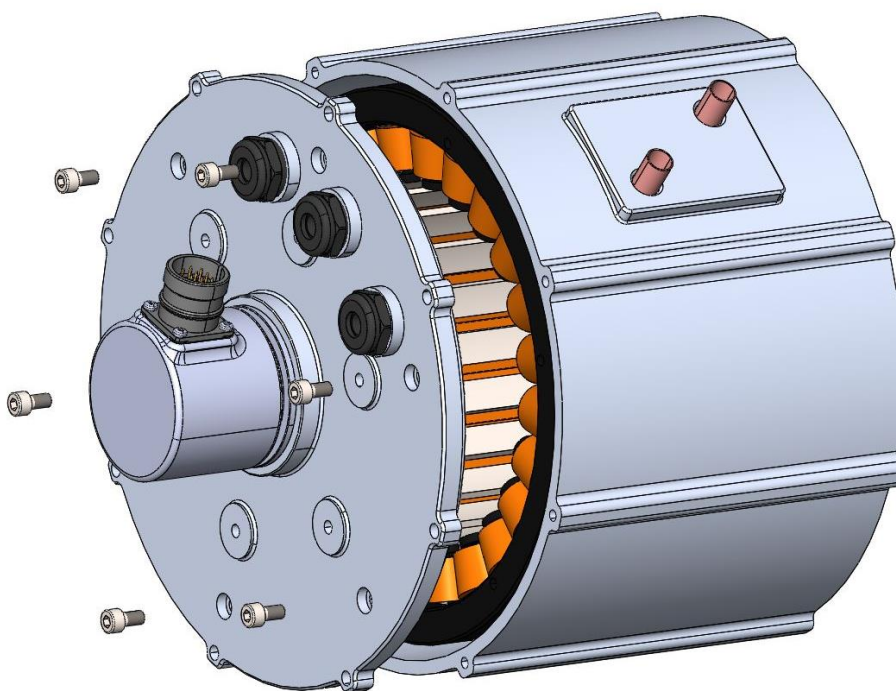


Figura 32. Muntatge, pas 11

12. Cargolar la tapa amb la carcassa central. Cargols DIN 912 M5x16

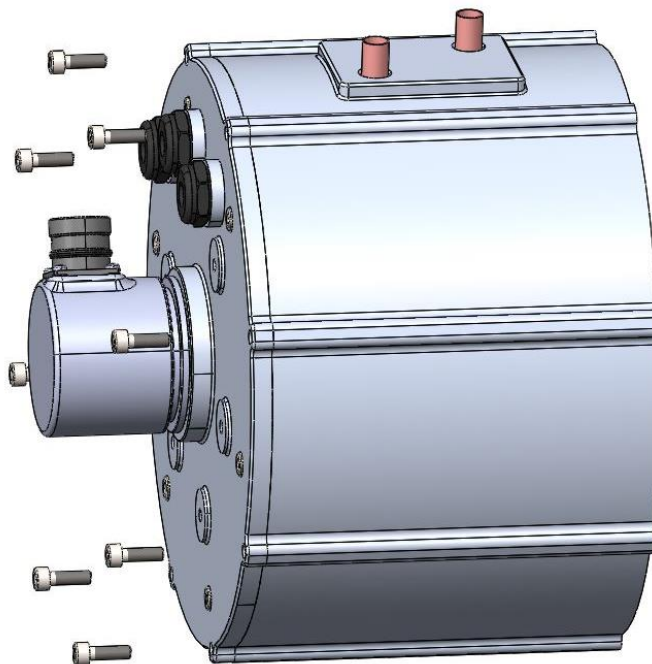


Figura 33. Muntatge, pas 12

13. Inserir l'estator dins del rotor, s'ha d'anar amb compte que l'encoder encaixi amb l'eix del motor.

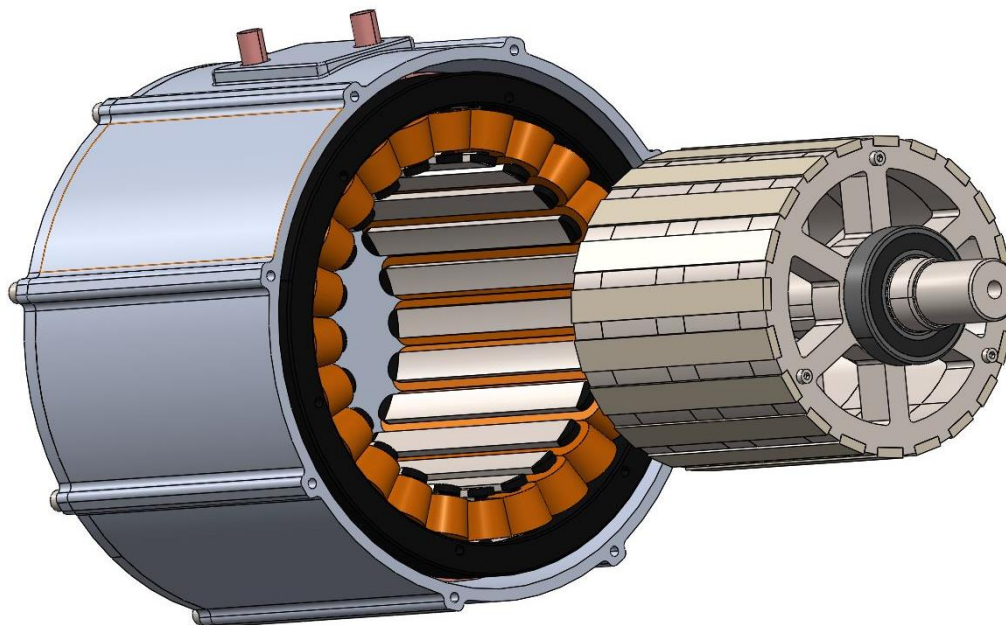


Figura 34. Muntatge, pas 13

14. Col·locar la tapa esquerra del motor i cargolar el suport de l'estator i la carcassa central. Cargols DIN 912 M5x10 pel suport i DIN 912 M5x16 per la carcassa

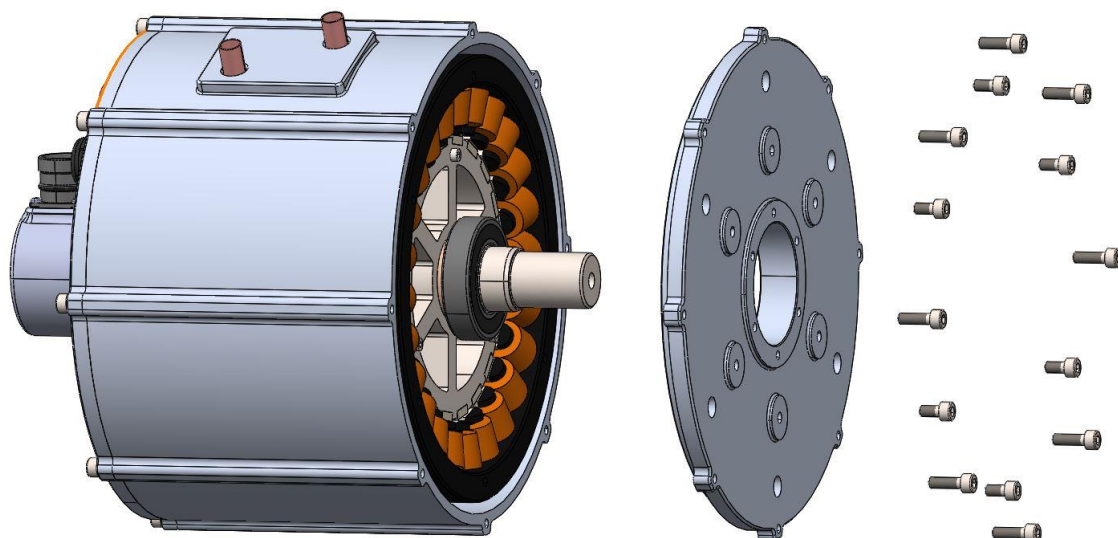


Figura 35. Muntatge, pas 14

Col·locar el retenidor a l'eix i muntar el tensor dels rodaments amb 6 cargols DIN 7984 M5x8

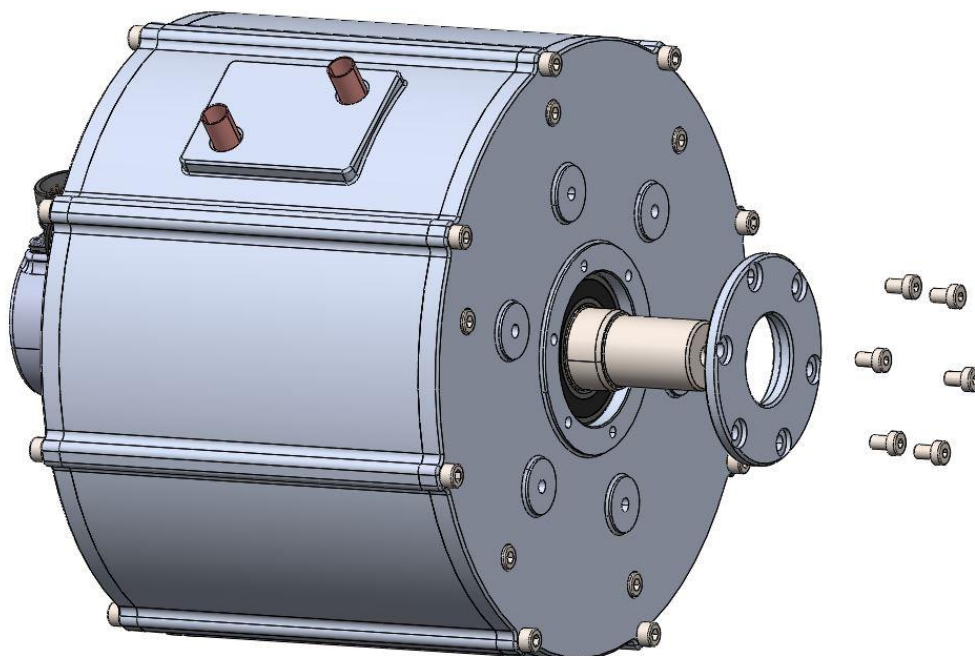


Figura 36. Muntatge, pas 15

16. Muntar els racors per l'entrada i la sortida dels tubs de refrigeració.

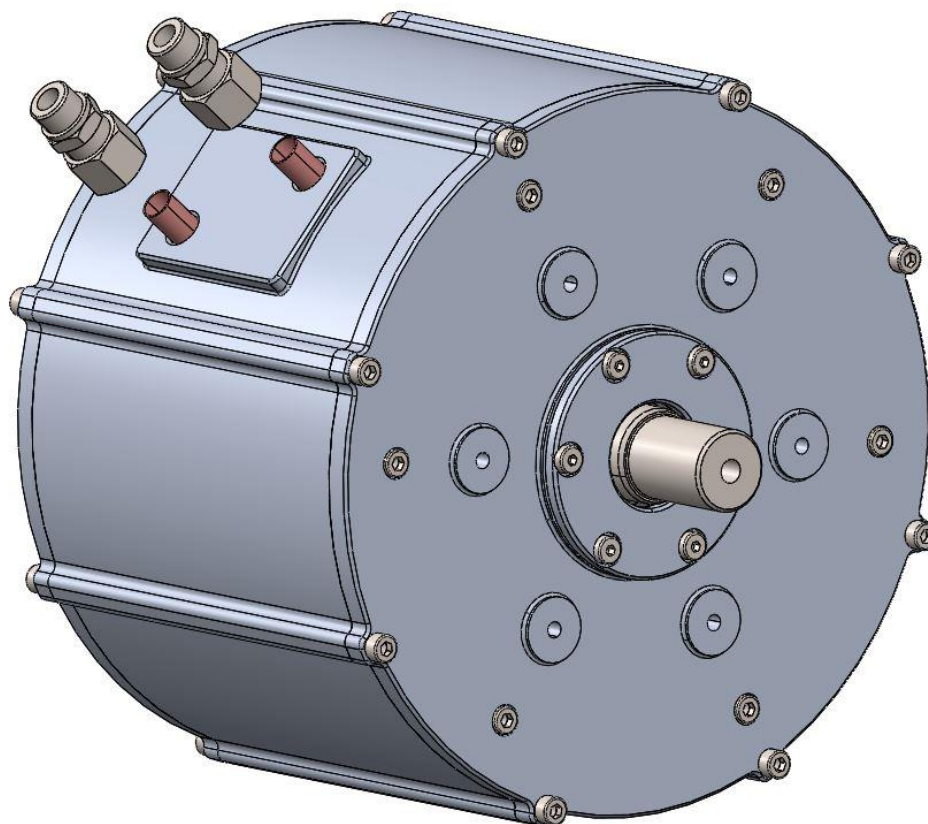


Figura 37. muntatge, pas 16

7. Disseny de la transmissió

Tal i com està especificat, la transmissió ha de ser per corretja amb una relació de 3,33. Després d'analitzar el mercat s'ha decidit que per tal de poder arribar a la potència màxima es farà servir una combinació de corretja i politja amb un perfil AT-10 i un gruix de 32 mm. En la selecció d'aquest tipus de corretja, també ha influït l'espai disponible entre la roda posterior de la motocicleta i el basculant que limita el gruix de la politja a un màxim de 47 mm.

A continuació s'exposen els càlculs necessaris en el disseny.

7.1. Politges

Per tal de complir amb la relació de transmissió de 3,33 s'ha buscat dues politges de catàleg amb perfil AT10 que ens permetin complir aquest requeriment.

La politja conductora, situada a l'eix del motor serà de 18 dents amb un diàmetre primitiu de 57.29 mm i la politja conduïda tindrà 60 dents i un diàmetre primitiu de 190.98 mm.

$$(15) \quad i = \frac{60}{18} = \frac{190.98}{57.29} = 3,33$$

Ambdues politges, per tal que la corretja no es desplaci lateralment tindran guies, tal i com es mostra a la figura 38 i, per tal de que hi càpiga la corretja, s'ha elegit la mesura de gruix de 37mm.

La politja conductora anirà muntada a l'eix amb una xaveta DIN6885 de 8x7x25mm [1].

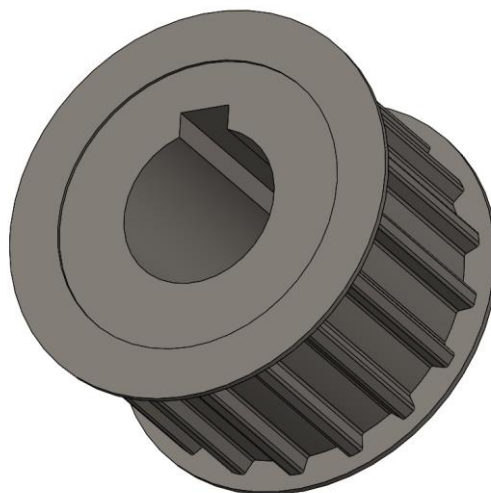


Figura 38. Politja entrada

La politja conduïda, aprofitarà l'encaix existent a la llanta posterior mitjançant 5 cargols M10. Aquesta s'haurà de mecanitzar ja que no és una politja estàndard.

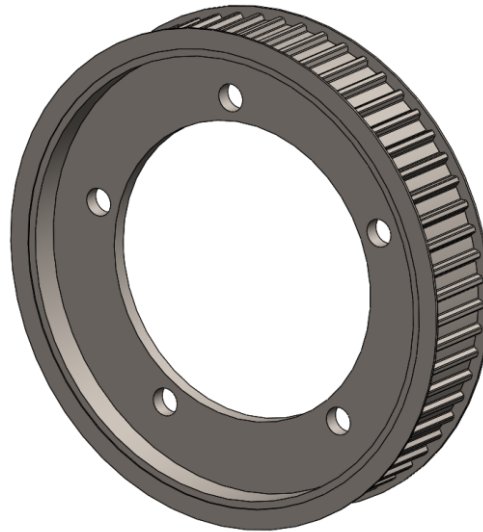
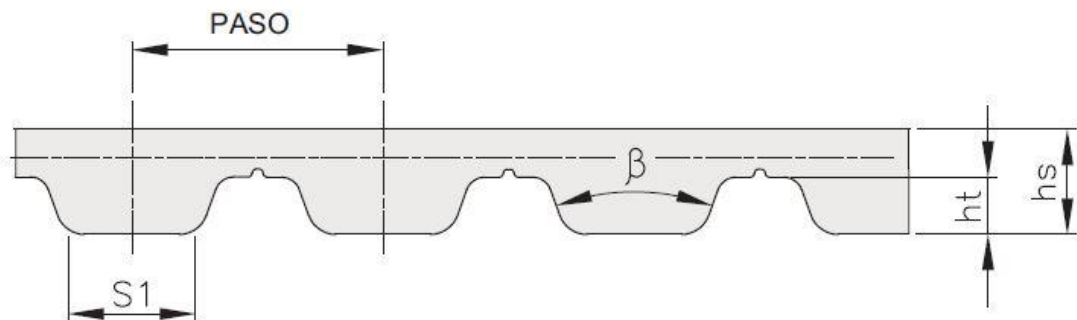


Figura 39. Politja sortida

7.2. Corretja

Com s'ha dit anteriorment, la corretja tindrà un perfil AT10 tal i com el de la figura 40



tipo	paso mm	hs mm	toll. mm	ht mm	S1 mm	β grados
AT 5	5	2,7	$\pm 0,15$	1,2	2,5	50
AT 10	10	4,5	$\pm 0,30$	2,5	5,0	50

Figura 40. Perfil corretja

Aquesta haurà de suportar un esforç màxim de:

$$(16) \frac{\text{Parell motor}}{\text{Radi politja}} = \frac{160Nm}{\frac{0,05729m}{2}} = 5585 \text{ N}$$

Segons el fabricant la tensió de treball màxima de la corretja de 32 mm de gruix és de 5390 N. Aquest valor és inferior a la força màxima que pot fer el motor. Tot i això, com que la major part del temps de funcionament serà per sota d'aquesta força màxima i la tensió de ruptura de la corretja és d'uns 19000 N, seguim mantenint aquesta com a millor opció, ja que la directament superior de 50 mm de gruix no permet l'encaix de la politja entre la llanta i el basculant.

La distància entre eixos del motor i de la roda posterior és de 712mm. Per tant la longitud de la corretja serà de:

$$(17) \quad L = 2 * \text{Dist eixos} + \frac{\pi}{2} (D_{polgran} + d_{pol petita}) + \frac{(D_{polgran} - d_{pol petita})^2}{4 * \text{Dist eixos}} = 1820 \text{ mm}$$

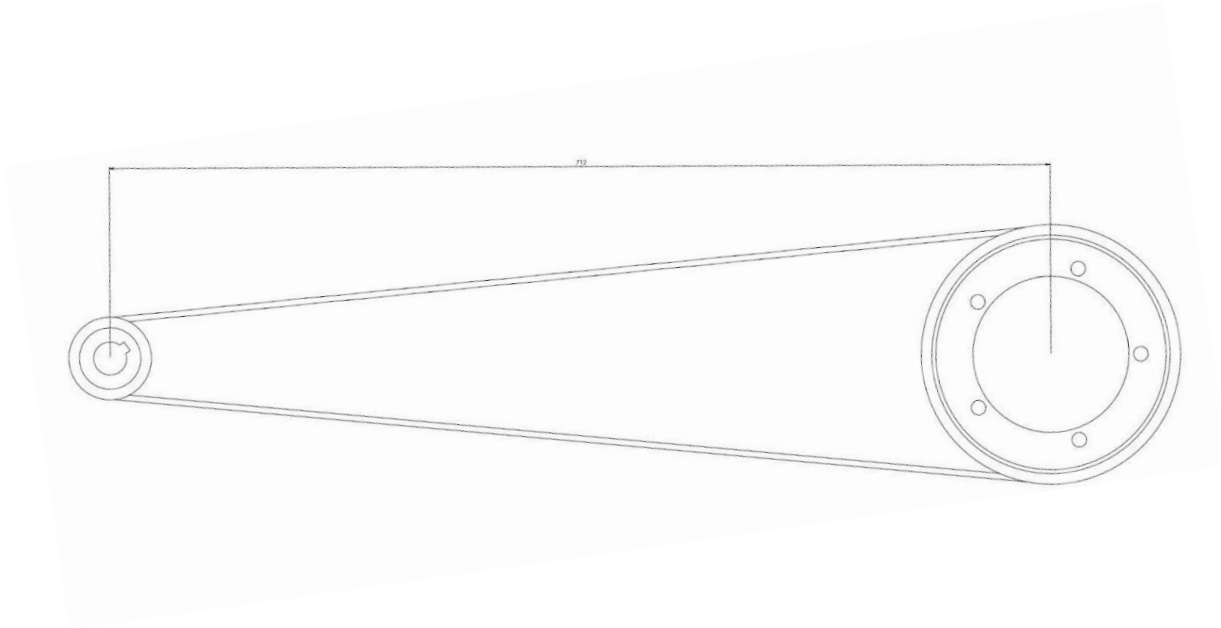


Figura 41. Disposició de la transmissió

8. Acoblament

En paral·lel al disseny del motor i la transmissió, s'ha anat fent l'acoblament del conjunt en la motocicleta original. Aquest procés s'ha fet merament orientatiu de cara a futur i no pretén contemplar tot l'estudi necessari per portar a la realitat el projecte.

Primer de tot s'ha desmuntat part de la motocicleta original i s'han pres les mides necessàries per tal de dissenyar en 3D tota la part estructural. Dins d'aquestes mesures s'inclouen angles, entre eixos, punts de suport, etc.



Figura 42. Imatge procés de desmuntatge



Figura 43. Estructura inicial

Un cop resolta la part estructural existent, s'ha procedit a fer la integració del motor, transmissió i bateries fent els suports necessaris per connectar-los amb el xassís de la motocicleta.

8.1. Bateria

La bateria té tres punts de suport a cada banda del xassís. Un a la part superior com es veu a la figura 44 i dos punts més de suport a la part davantera i al suport del motor.

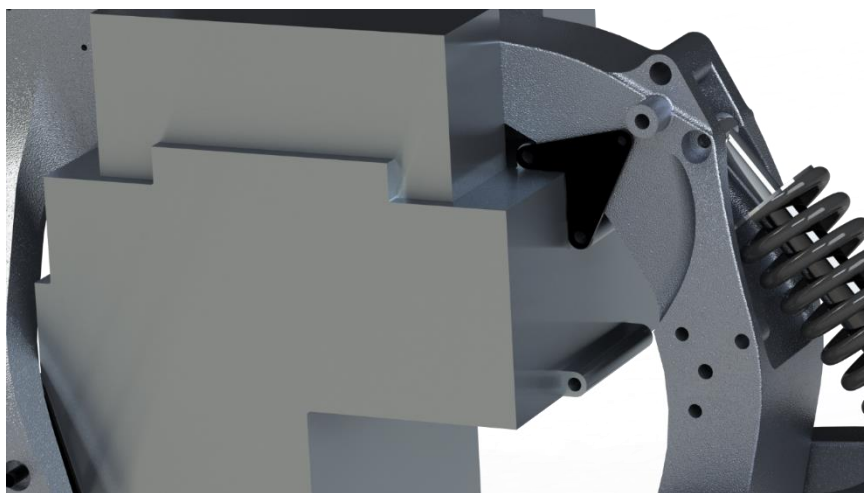


Figura 44. Suport superior bateria



Figura 45. Suport davanter bateria

8.2. Motor

El motor està suportat per dos peces collades al xassís i a la bateria.

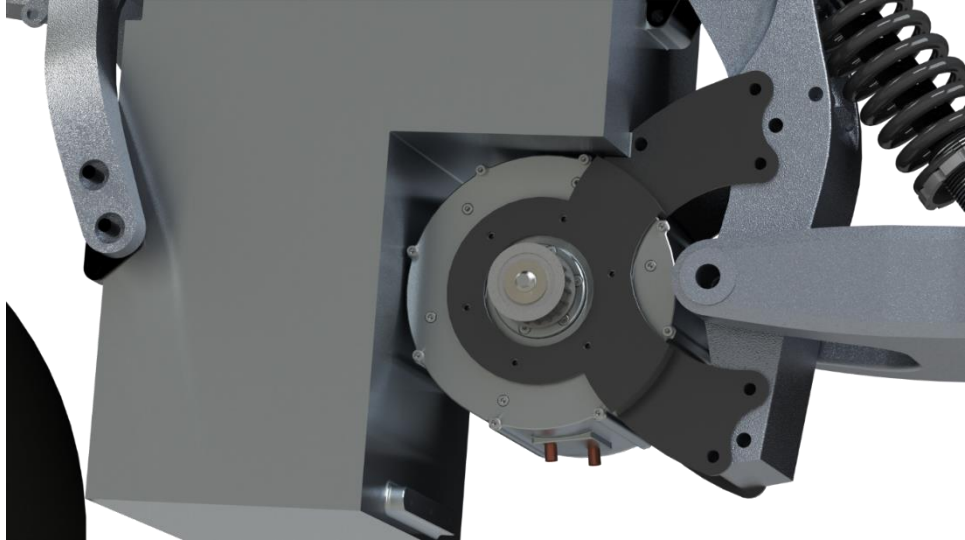


Figura 46. Suport motor

8.3. Transmissió

La transmissió va lleugerament desplaçada respecte l'eix longitudinal del basculant de tal forma que al moure's el basculant la corretja no entri en contacte i es vegi forçada per aquest. D'aquesta manera només es preveu tensar la corretja amb el mateix sistema original de la cadena que és desplaçant la roda enrere.

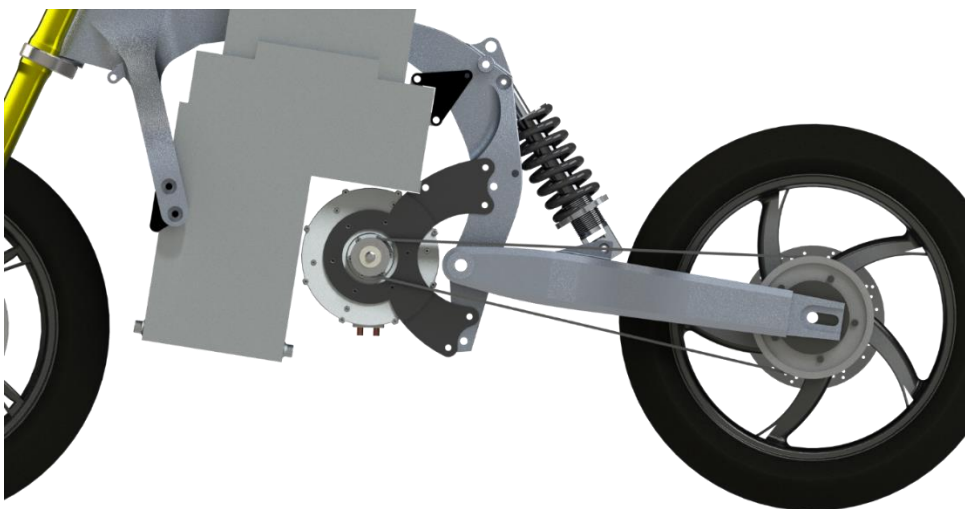


Figura 47. Transmissió

9. Pressupost

Dins del pressupost s'han diferenciat dos costos, el del projecte, on s'inclou el personal i el software i el cost de fer la conversió de la motocicleta a nivell de materials.

9.1. Pressupost projecte

<u>Personal</u>			
Tasca	Hores	cost/hora	Cost total
Planificació	20	50,00 €	1.000,00 €
CAD	50	50,00 €	2.500,00 €
Benchmarking	32	50,00 €	1.600,00 €
Especificacions	45	50,00 €	2.250,00 €
Disseny motor	55	50,00 €	2.750,00 €
Disseny transmissió	45	50,00 €	2.250,00 €
Integració	43	50,00 €	2.150,00 €
Plànols	30	50,00 €	1.500,00 €
Redacció	40	50,00 €	2.000,00 €
		TOTAL	18.000,00 €
<u>Software</u>			
MSOffice			144,00 €
CatiaV5			5.000,00 €
Solidworks			3.400,00 €
		TOTAL	8.544,00 €
TOTAL PROJECTE			26.544,00 €

9.2. Pressupost conversió

En aquests costos són orientatius i no inclouen partides com el temps que s'ha de dedicar a muntar el conjunt. Tal i com es pot veure, el cost més alt de la transformació recau en el paquet de bateries.

<u>Conversió</u>	
Motor	Cost
Material	100,00 €
Mecanitzats	960,00 €
Imants	400,00 €
Cable de coure	10,00 €
Tubs de coure	12,00 €
Cargoleria	10,00 €
Resolver	100,00 €
Altres	80,00 €
TOTAL MOTOR	1.672,00 €
Transmissió	
Politges	50,00 €
Corretja	25,00 €
Mecanitzats	80,00 €
TOTAL TRANSMISSIÓ	155,00 €
Bateria	
Cel·les	10.800,00 €
BMS	2.000,00 €
Cablejat	100,00 €
Caixa	150,00 €
TOTAL BATERIA	13.050,00 €
Altres despeses	1.500,00 €
TOTAL	14.877,00 €

Conclusions

Aquest projecte tenia com a repte el disseny del conjunt motor elèctric-transmissió que pogués substituir a un motor de combustió convencional en una motocicleta de la marca Honda i model CB600f de l'any 2007. La base de les especificacions era tenir una moto elèctrica amb unes característiques semblants a la moto de combustió pel que fa referència a autonomia, velocitat i potència.

Ben aviat es va veure que aquest tipus de projectes tenen un nivell molt alt de complexitat, originat principalment per la mútua dependència entre la part elèctrica i la part mecànica. És a dir, es requereixen molts coneixements tant d'electricitat com de mecànica. Tot i la seva complexitat, s'ha aconseguit fer un disseny funcional del qual es pot partir per a fer una segona iteració del projecte. S'han recorregut degudament les etapes del projecte per finalment arribar a tenir el disseny del conjunt amb una proposta d'integració.

Després de l'anàlisi per a especificar la bateria, es va veure ràpidament que amb la tecnologia actual és molt complicat fer motocicletes amb rangs de quilometratge per dipòsit a l'alçada de les motocicletes de combustió. En cas de voler igualar aquestes distàncies, o bé s'ha d'augmentar el pes de la bateria molt per sobre dels pesos actuals o s'ha de trobar una nova tecnologia d'emmagatzematge d'energia elèctrica.

Aquest projecte, pensat per fer una conversió a nivell personal, és a dir sense involucrar un procés empresarial i de negoci, té una viabilitat molt baixa degut a l'alt cost de les bateries. En un context més ampli, el volum i cost actual de les bateries tenen com a resultat que el mercat actual de les motocicletes elèctriques sigui principalment per desplaçaments curs en àrees urbanes i metropolitanes. Ara bé, tant en el cost com en la densitat d'energia cal estar atents a l'evolució de la tecnologia que pot portar com a resultat una migració massiva a mig termini cap a les motocicletes elèctriques, ja que, tota la resta de components necessaris són molt més barats i eficients que el seu homòleg en combustió.

De cara a futur, es proposa treballar en la optimització motor, tant a nivell elèctric com mecànic per tal de mantenir prestacions a la vegada que es redueix el pes del conjunt.

Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair al tutor d'aquest projecte, el professor Miquel Sararols, per donar-me el seu suport a la hora de decidir fer aquest treball i per la ajuda que m'ha donat al llarg de tot el procés.

En segon lloc, vull agrair a la meva família i amics també el seu suport incondicional no només a la hora de fer aquest projecte sinó durant tota la meva etapa universitària.

Finalment, l'últim agraïment el vull donar a l'escola, on he après tots els coneixements necessaris per tirar endavant aquest projecte que aspiro a poder fer realitat algun dia.

Bibliografía

- [1] SCHAEFFLER, *Technical pocket guide*. Germany: 2014
- [2] A.CHEVALIER, *Dibujo Industrial*, Limusa 2005
- [3] Enrique L. Carrillo Arroyo, *MODELING AND SIMULATION OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVE SYSTEM*, Puerto Rico: 2006.
- [4] Shane W. Colton, *Design and Prototyping Methods for Brushless Motors and Motor Control*. MIT 2008
- [5] Hung Vu Xuan, D. Lahaye, H. Polinder, J. A. Ferreira, *Influence of Slot/Pole Number Combination on Performances of Permanent Magnet Machines with Concentrated Windings for Ship Application*, Delft University of Technology 2011
- [6] RENAME, *Relación entre potencia y tamaño del eje*, 2014
- [7] M.J. Soleimani Keshayeh, S. Asghar Gholamian, *Optimum Design of a Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor for industrial Applications*, 2012
- [8] <https://www.electrical4u.com/electrical-engineering-articles/electric-motor/>
- [9] <http://neilorme.com/Electric%20Motor%20Theory.shtml>
- [10] <http://www.masinaelectrica.com/45kw-bushless-motor-design/>
- [11] <https://www.causadirecta.com/especial/calculo-de-velocidades/tablas/tabla-de-factores-de-rozamiento-del-pavimento-para-neumaticos-de-goma>
- [12] <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html>